

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

**Havarijní dochlazování aktivní zóny jaderné
elektrárny MIR 1200**

**Emergency Core Cooling of Nuclear
Power Plant MIR 1200**

Student: Jaroslav Víteček
Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaroslav Víteček**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3907R004 Provoz a řízení v energetice**
Téma: **Havarijní dochlazování aktivní zóny jaderné elektrárny MIR 1200**
Emergency Core Cooling of Nuclear Power Plant MIR 1200

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerše literatury popište koncepci a funkci havarijního dochlazování reaktoru MIR 1200 III+ generace a navrhnete tepelný výměník havarijního dochlazování pro řešení havarijních režimů a k plánovanému dochlazování při odstávkách reaktoru.

Proveďte zjednodušený tepelný výpočet havarijního výměníku.

Tepelný výkon jaderné elektrárny	3200 MWt
Tlak syté páry	7,00 MPa
Teplota chladiva v I. okruhu	298,2/328,9 °C
Tlak v I. okruhu	16,2 MPa
Parní výkon PG	1 602 t/hod
Teplota napájecí vody	225 °C
Max. teplota dochlazovacího media	150 °C

Seznam doporučené odborné literatury:

Radko Hejzlar : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X

Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.

František Hezoučky: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně, spomoci vedoucího bakalářské a literatury, která je uvedena v závěru práce. Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc. za pomoc, bez níž by se práce vyvíjela o poznání složitěji.

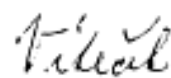
V Ostravě 17.5.2011


Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě : 17.5.2011


.....
Podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:
Okružní 24, Bruntál

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VÍTEČEK, J. *Havarijní dochlazování aktivní zóny jaderné elektrárny MIR 1200*. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2011, 40 stran, Bakalářská práce, vedoucí: Kolat, P.

Bakalářská práce se zabývá problematikou havarijních a dochlazovacích výměníků v aktivní zóně jaderné elektrárny MIR 1200. První část je zaměřená na základní členění primárního okruhu jaderné elektrárny, včetně schémat a popisu části aktivní zóny. Popis havarijního systému, včetně popisu a obrázku. Dále popis konkrétního havarijního výměníku, zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru, havarijní odstavení reaktoru, plánované odstavení reaktoru, popis a funkce trubkových výměníků, včetně obrázku.

Druhá část obsahuje teoretický rozbor a základní tepelný výpočet zvoleného havarijního výměníku tepla. *Pomocí základních rovnic termomechaniky se vypočítá výměník, pro předem zvolené vstupní a výstupní teploty ohřívaného a ochlazovaného média*. Grafická část bude obsahovat náčrt výměníku od firmy Královopolské strojírna – Brno.

ANOTATIONS OF BACHELOR'S THESIS

VÍTEČEK, J. *Emergency Core Cooling of Nuclear Power Plant MIR 1200*. Ostrava: Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical university of Ostrava, 2011, 40 pages, Bachelor thesis, supervisor: Kolat, P.

The bachelor thesis deals with problem of emergency and cooling exchanger in active zone of nuclear power plant MIR 1200. The first part is focused on the basic segmentation of primary circuit of nuclear powerstation including schemes and description of a part of the active zone. Description of emergency system including its description and image. There is also description of concrete emergency exchanger, the decay heat after the removal of reactor shutdown, emergency removal of the reactor, planned shutdown of the reactor, description and function of straight-tube exchangers including image.

The second part contains theoretical analysis and basic heat transfer calculation of selected emergency heat exchanger. *There is calculated exchanger by basic equations of thermodynamics for pre-selected inlet and outlet temperature of heated and cooled medium*. The graphic part contains an outline of exchanger from the company Královopolské strojírna - Brno.

OBSAH:

1. Úvod.....	1
2. Základní členění primárního okruhu JE	2
2.1 Reaktor.....	2
2.2 Paragenerátor.....	3
2.3 Kompenzátor objemu	3
2.4 Hlavní cirkulační čerpadla.....	4
2.5 Systém doplňování primárního okruhu.....	5
3. Havarijní systémy	5
3.1 Aktivní havarijní systémy (MIR 1200)	5
3.1.1 Účel systému	5
3.1.2 Sprchový systém	6
3.1.3 Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování zóny	6
3.1.4 Systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování	7
3.1.5 Systém ohřevu nádrže havarijní zásoby kyseliny borité.....	7
3.2 Složení a technický popis systému	7
3.2.1 Složení a umístění systému	7
3.2.2 Technický popis zařízení	8
4. Tepelný výměník havarijního dochlazování (MIR1200	17
4.1 Systém odvodu zbytkového tepla.....	17
4.2 Konstrukce.....	17
4.3 Funkce	18
4.4 Trubkovnice.....	18
4.5 Trubkový svazek	19
4.6 Dělený zámek.....	19
5. Zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru	21
6. Havarijní odstavení reaktoru	23
7. Plánované odstavení bloku a vychlazování primárního okruhu	24
8. Druhy výměníku	25
8.1 Trubkové výměníky	25
8.1.1 Trubka v trubce	25

8.1.2	Trubkové výměníky	25
8.1.3	Spirálové výměníky	26
8.2	Deskové výměníky	26
8.2.1	Rozebíratelné výměníky	26
8.2.2	Nerozebíratelné výměníky	27
8.2.3	Spirálové výměníky	27
9.	Návrh výměníku	28
9.1	Popis výměníků	28
9.2	Vstupní parametry médií	28
9.2.1	Průtok média	28
9.2.2	Rychlost proudění	28
9.2.3	Průtočné množství.....	28
9.2.4	Hmotnostní tok vody.....	28
9.3	Určení střední teploty vody ohřívané.....	29
9.4	Určení střední teploty vody ochlazované	29
9.4.1	Určení celkové střední teploty	29
9.5	Výpočet tepelného výkonu	29
9.5.1	Výpočet hmotnostního průtoku ohřívajícího média.....	29
9.5.2	Výpočet hmotnostního průtoku ochlazovaného média.....	30
9.5.3	Výpočet tepelného výkonu ohřívajícího média.....	30
9.5.4	Výpočet tepelného výkonu ochlazovaného média.....	30
9.5.5	Střední tepelný výkon	30
9.6	Reynoldsovo kritéria pro ohřívající médium.....	30
9.7	Reynoldsovo kritéria pro ochlazované médium.....	30
9.7.1	Výpočet plochy přepážky	31
9.8	Nusseltovo kritérium pro ohřívající médium	31
9.9	Nusseltovo kritérium pro ochlazované médium.....	31
9.10	Výpočet součinitele přestupu tepla ohřívajícího média	32
9.11	Výpočet součinitele přestupu tepla ochlazovaného média	32
9.12	Výpočet součinitele prostupu tepla.....	32
9.13	Výpočet vodního ekvivalentu ohřívajícího média	33
9.14	Výpočet vodního ekvivalentu ochlazovaného média	33
9.15	Výpočet parametrů	33
9.16	Výpočet teplosměnné plochy.....	34
9.17	Počet trubek.....	34
10.	Závěr.....	35

11. Seznam použité literatury	36
12. Přílohy	37
12.1 Příloha č. 1 - Fyzikální vlastnosti vody při tlaku 98,1 kPa, popř. při tlaku na mezi sytosti	37
13. Seznam výkresové dokumentace.....	37

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Jednotka	Popis
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
Re	[1]	Reynoldsovo kritérium
Nu	[1]	Nusseltovo kritérium
w	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost proudění
\dot{V}	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	průtočné množství
l	[m]	délka
Tr	[1]	počet trubek
c_p	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita
t_s	$[^{\circ}C]$	střední teplota
\dot{m}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok
\dot{Q}	[W]	tepelný výkon
d_1	[m]	vnitřní průměr trubky
d_2	[m]	vnější průměr trubky
d_s	[m]	průměr přepážky
S	$[m^2]$	teplosměnná plocha
k	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
M	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok
W	$[kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}]$	vodní ekvivalent
$\Delta t_{stř}$	$[^{\circ}C]$	střední logaritmicky teplotní rozdíl
P	[1]	parametr
R	[1]	parametr
τ	[s]	čas
α	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
η	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$	účinnost
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná vodivost
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	viskozita
ρ	$[kg \cdot m^3]$	hustota

1. Úvod

Dnešní svět má dva hlavní globální problémy – přístup k energetickým zdrojům a negativní vliv na ekologii. Hlavně co se týče skleníkových vlivů na změnu klimatu na planetě. Oba problémy lze řešit jadernou energetikou. Jaderné elektrárny neprodukují žádné skleníkové plyny a je to nejlevnější zdroj energie. Jaderná energetika je výhodná náhrada tepelných elektráren, jelikož zásoby uhlí se zmenšují a cena uhlí roste. Na druhé straně budí i rozpaky negativní, které se odrážejí v dnešním světě ze strachu z jaderné havárie, například z aktuální havárie v japonské jaderné elektrárně Fukušima. V jaderném reaktorů je několik zabezpečovacích systémů proti neřízené štěpné reakci, kterými se zabývá moje bakalářská práce.

Tepelné havarijní výměníky, které slouží v případě havárie k dochlazování reaktoru, nebo při plánovaném odstavování bloku. Havarijní výměníky se nacházejí v aktivní zóně primárního okruhu. Médiem je silně zředěná kyselina boritá, která snižuje neřízenou štěpnou reakci.

MIR 1200 je česko - ruský projekt na výstavbu nového (třetího) bloku jaderné elektrárny Temelín. Je to jeden z možných třech kandidátů na výstavbu. České firmy jsou zapojeny do výstavby a výroby komponentů z 80 %. Jedná se o reaktor 3+ generace o hrubém elektrickém výkonu 1158 MW.

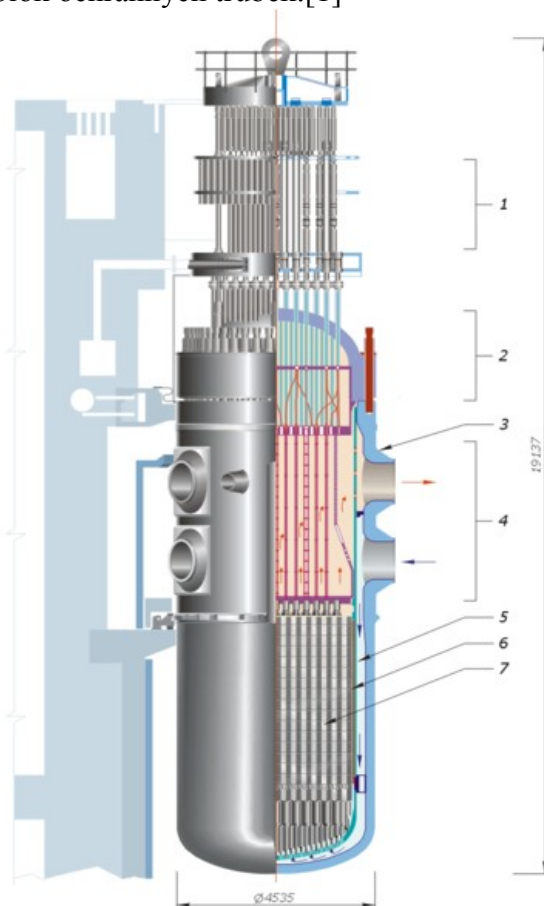
2. Základní členění primárního okruhu JE

2.1 Reaktor

V jaderném reaktorů probíhají řetězové jaderné reakce, lze je kontrolovat a řídit ve stabilním stavu.

Reaktory typu VVER/PWR jsou tlakovodní reaktory, jsou to nejpoužívatelnější reaktory (60% všech typů reaktorů jsou VVER). Reaktory jsou chlazený vodou o vysokém tlaku, jejichž moderátor je voda. Voda slouží jako ochranný prvek reaktorů. Pokud není v reaktoru voda, tak reakce se zastaví. Pára pro turbogenerátor se vyrábí mimo primární okruh v paragenerátoru (viz obr 2.2). [6]

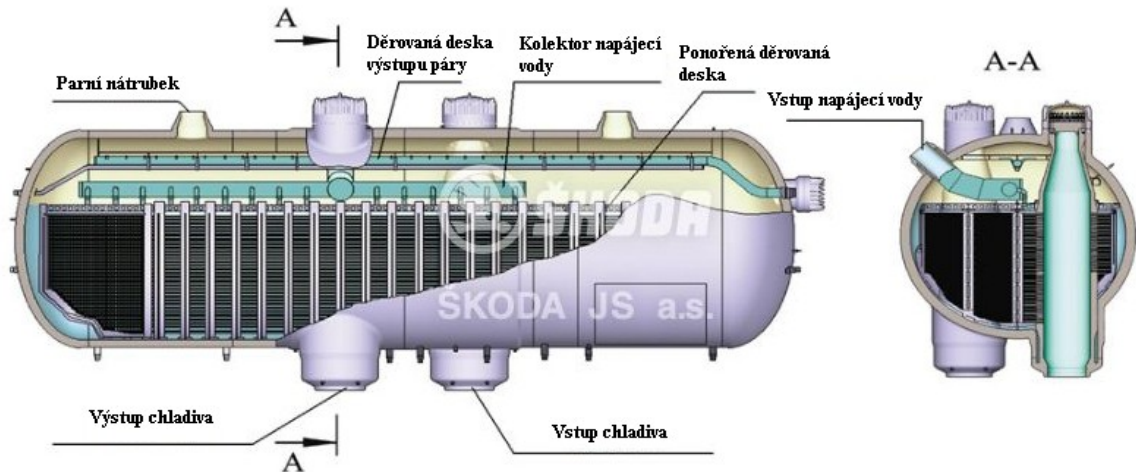
Vnitřní části reaktoru (aktivní zóna) jsou umístěny v **tlakové nádobě**. Je zhruba 11 m vysoká a má vnější průměr 4,5 m. Tloušťka stěny její válcové části je 193 mm. Nádobu je navržena na tlak 17,6 MPa při teplotě 350 °C (provozní tlak je 15,7 MPa při teplotě 290 – 320 stupňů C). Je vyrobena z nízkolegované chrom-niklmolybden-vanadové oceli. Ke sledování křehnutí tlakové nádoby v důsledku působení neutronového záření jsou v reaktoru umístěny svědečné vzorky materiálů, které se pravidelně měří a hodnotí. Tato nádoba je opatřena odnímatelným víkem, připevněným hydraulicky předepjatými svorníky a je utěsněna dvěma kovovými samotěsnícími kroužky, jejichž těsnost je nepřetržitě monitorována. Vnitřní části reaktoru tvoří: šachta aktivní zóny,boční plášť(chrání tlakovou nádobu před účinky neutronového záření), blok ochranných trubek.[1]



Obr. 2.2 Schéma reaktoru MIR 1200 [10]

2.2 Paragenerátor

Je to výměník, ve kterém voda primárního okruhu předává své teplo vodě sekundárního okruhu. Vzhledem k tomu, že teplota vody v primárním okruhu je značně vyšší než teplota varu vody v sekundárním okruhu (což je způsobeno vysokým tlakem v primárním okruhu) dochází k mohutnému vývinu páry, která je odváděna na vysokotlaký díl turbíny sekundárního okruhu. Chladicí smyčka primárního (viz obr 2.3). [1]

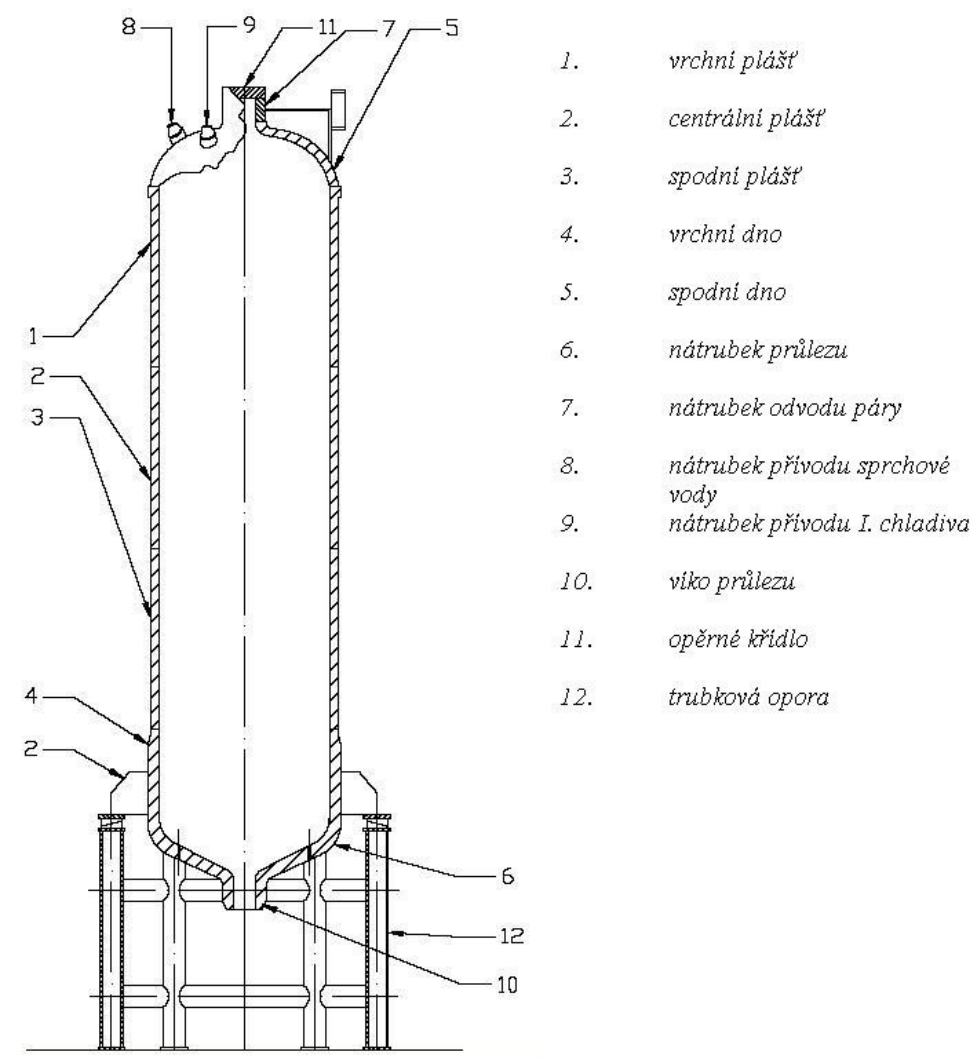


Obr. 2.3 Paragenerátor MIR 1200 [11]

2.3 Kompenzátor objemu

Systém kompenzace objemu je nezávislým systémem reaktorů, je připojen k primárnímu okruhu. Systém vyrovnává tlakové a objemové změny v primárním okruhu jaderné elektrárny, na který mají vliv tepelné dilatace chladiwa.

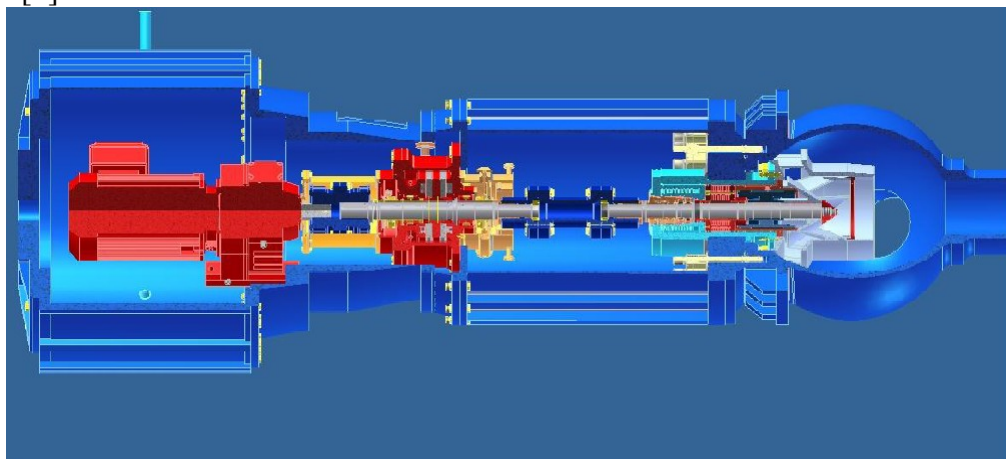
Nádoba ve spodní části napojená na horkou větev smyčky, na horní část je napojena studená větev smyčky, dále jsou do ní zabudovány elektrické ohříváky, který vyrovnává změny tlaku a objemu chladiwa (viz obr 2.4). [1]



Obr. 2.4 Schéma kompenzátoru objemu [12]

2.4 Hlavní cirkulační čerpadla

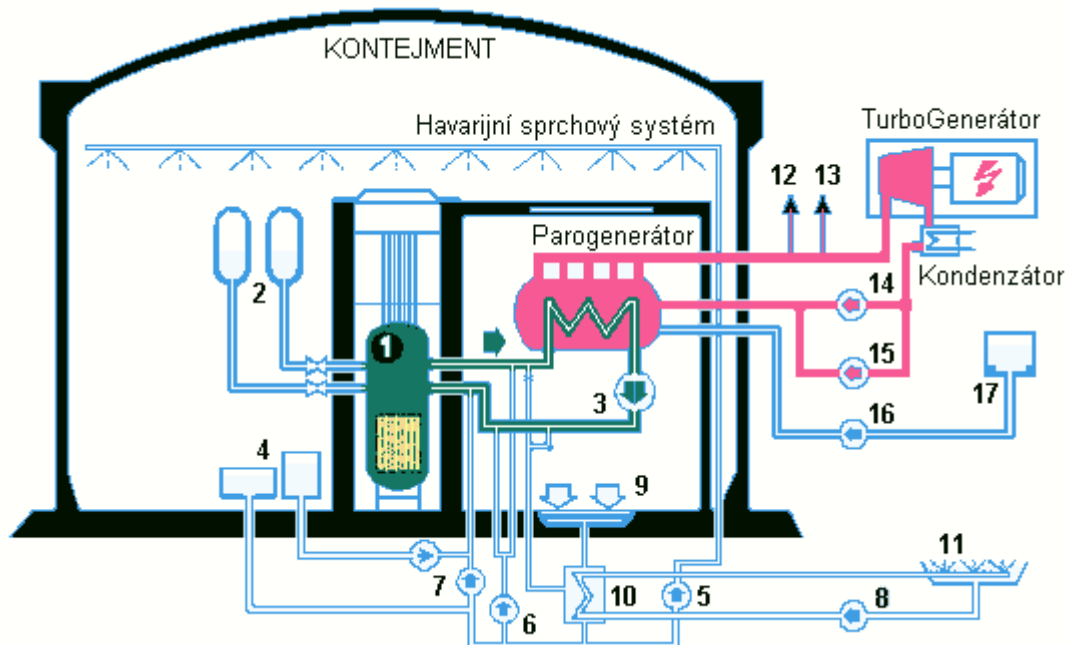
Zajišťuje cirkulaci chladiva (vody) v primárním okruhu odpovídajícímu tepelnému výkonu reaktoru. Jedná se o odstředivé vertikální čerpadlo, na každý blok připadají (viz obr 2.5). 4.[1]



Obr. 2.5 Hlavní cirkulační čerpadlo [13]

2.5 Systém doplňování primárního okruhu

Slouží k nastavení požadované koncentraci kyseliny borité, přimíchávané do vody[1]



- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1. Reaktor | 11. Bazény rozstřiku technické vody |
| 2. Hydroakumulátory | 12. Pojišťovací ventil paragenerátoru |
| 3. Hlavní cirkulační čerpadlo | 13. Přepouštěcí stanice do atmosféry |
| 4. Nádrže koncentráту bóru | 14. Turbonapájecí čerpadla (150 %) |
| 5. Sprchové čerpadlo (3x100 %) | 15. Pomocná napájecí čerpadla |
| 6. Nízkotlaké doplňovací čerpadlo | 16. Havarijní doplňovací čerpadla |
| 7. Vysokotlaká vstřikovací čerpadla (600 %) | 17. Nádrž demineralizované vody |
| 8. Čerpadlo technické vody (300 %) | |
| 9. Nádrž havarijní zásoby H_3BO_3 | |
| 10. Chladič systému normálního a havarijního dochlazování (300 %) | |

Obr. 2.1 Schéma I. a II. okruhu jaderné elektrárny MIR 1200 [9]

3. Havarijní systémy

3.1 Aktivní havarijní systémy (MIR 1200)

3.1.1 Účel systému

Aktivní havarijní systémy jsou rozděleny na následující systémy (viz obr 3.1)

- sprchový havarijní systém
- nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování aktivní zóny

- c) systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování
- d) systém ohřevu nádrže - jímky havarijní zásoby kyseliny borité

3.1.2 Sprchový systém

Sprchový systém je určen ke snížení tlaku v hermetické zóně při roztržení potrubí primárního okruhu nebo parovodu sekundárního okruhu ke kterému dojde za provozu bloku. Sprchový systém dále slouží k převádění radioaktivních látek, zejména jódu z paroplynné fáze, vzniklé při porušení těsnosti primárního okruhu, do fáze kapalné. Těmito dvěma funkcemi zajišťuje snížení úniků radioaktivních látek do životního prostředí. Další funkcí sprchového systému je havarijní zaplnění bazénu skladování vyhořelého paliva v případě poruchy systému chlazení bazénů vyhořelého paliva.

Sprchový systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. Každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3x100 %. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, nádrže chemických reagentů, havarijního výměníku, armatur, sprchových trysek a spojovacího potrubí.

Sprchové čerpadlo má na své sání přiveden roztok kyseliny borité ze společné nádrže havarijní zásoby. Sací potrubí je společné pro nízkotlaký systém havarijního a normálního doplňování a systém havarijního vysokotlakého doplňování. Do sání sprchového čerpadla je přisáván ejektorem roztok chemických reagentů z nádrže za účelem vyvážení radioaktivních izotopů jódu v kontejnmentu v případě havárie spojené s rozběsněním primárního okruhu. Pracovní kapalina pro ejektor je přivedena z výtaku sprchového čerpadla. Nádrž chemických reagentů se zaváží hydroxidem draselným, kyselinou boritou a hydrazinem. Na přípravu roztoku je do nádrže přiveden čistý kondenzát. Promíchávání roztoku se provádí pomocí čerpadla, až do úplného rozmíchání roztoku. čerpadlo je společné pro všechny tři sprchové systémy. Pomocí tohoto čerpadla se provádí též periodické promíchání nádrží za provozu bloku na výkonu.

3.1.3 Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování zóny

Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování aktivní zóny k :

1. havarijnímu dochlazování aktivní zóny reaktoru a následujícímu dlouhodobému odvodu zbytkového tepelného výkonu z aktivní zóny při haváriích spojených s roztěsněním primárního okruhu, včetně roztržení hlavního cirkulačního potrubí
2. plánovanému dochlazování primárního okruhu při odstavení reaktoru a odvodu zbytkového tepelného výkonu z aktivní zóny při výměně paliva
3. odvodu zbytkového tepelného výkonu z aktivní zóny při opravách reaktorového zařízení se snížením hladiny chladiva v reaktoru do úrovně osy chladných nátrubků bez demontáže horního bloku (víka reaktoru) a bez vyvážení aktivní zóny.

Nízkotlaký systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. Každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3 x 100 %. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, havarijního výměníku, dochlazovacího kolektoru, armatur a spojovacího potrubí.

Sání čerpadel havarijního a normálního dochlazování (nízkotlaký) je připojeno přes výměník na nádrž zásoby kyseliny borité. Obsah vod této nádrže je možno čistit na čistící stanici vod bazénů a nádrží.

Výtlačné trasy čerpadla jsou před připojením na cirkulační smyčku opatřeny dýzami, které jsou určeny pro omezení průtoku vody vytékající z primárního potrubí v případě roztržení výtlačných tras nízkotlakého systému. Výtlak nízkotlakých čerpadel se též provádí zaplnění nádrže. Sací potrubí nízkotlakého systému je společné pro systém vysokotlaký a sprchový. Výtlak nízkotlakých čerpadel je opatřen malou a velkou recirkulační trasou. Případné úniky z primárního okruhu přes zpětné klapky jsou z výtlačných tras vedeny do systému organizovaných úniků.

3.1.4 Systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování

3.1.4.1 Systém havarijního vysokotlakého doplňování

Systém je za provozu bloku určen k havarijnímu doplňování roztoku kyseliny boritého primárního okruhu v režimech spojených s roztěsněním primárního okruhu a s kompenzovatelným únikem do $130 \text{ m}^3 / \text{h}$ při tlaku 9 MPa a $100 \text{ m}^3 / \text{h}$ při tlaku 10 MPa.

Vysokotlaký systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. Každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3 x 100 %. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, nádrže zásoby kyseliny borité a spojovacího potrubí.

3.1.4.2 Systém havarijního vysokotlakého vstřikování

Systém je za provozu bloku určen k havarijnímu doplňování roztoku kyseliny borité do primárního okruhu v režimech spojených s uvolňováním kladné reaktivity v aktivní zóně reaktoru při zachování vysokého tlaku v primárním okruhu.

Systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. Každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3 x 100 %. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, nádrže zásoby kyseliny borité a spojovacího potrubí.

3.1.5 Systém ohřevu nádrže havarijní zásoby kyseliny borité

Systém je určen k ohřevu nádrže na požadovanou teplotu roztoku kyseliny borité, aby v případě zapracování havarijních systémů nedošlo k teplotnímu šoku tlakové nádoby reaktoru. Důsledkem teplotního šoku je možnost porušení tlakové nádoby (prasknutí) vlivem nízké teploty vody dopravované pomocí havarijních systémů z nádrže havarijní zásoby do cirkulačních smyček primárního okruhu.

Systém se skládá ze dvou shodných tras, tvořených čerpadlem, výměníkem a spojovacím potrubím s armaturami. Každý kanál může pracovat samostatně, nebo mohou pracovat společně pro zrychlení ohřevu nádrže.

3.2 Složení a technický popis systému

3.2.1 Složení a umístění systému

Sprchový systém

<i>Název</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
Sprchové čerpadlo	3 ks	TQ11(21,31)D01
Nádrž zásoby roztoku boritanu	3 ks	TQ11(21,31)B01

draselného		(obr. 3.7)
Ejektor	3 ks	TQ11(21,31)D02
Sprchové kolektory	3 ks	
Sprchové trysky (jeden kolektor)	20 ks	
		TB90D01
Čerpadlo k míchání nádrží	1 ks	(obr. 3.6)

Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování

<i>Název</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
Nádrž havarijní zásoby kyseliny borité	1 ks	TQ10B01
Výměník hav. a norm. dochlazování	3 ks	TQ10(20,30)W01
Čerpadlo hav. a norm. dochlazování	3 ks	TQ12(22,32)D01
Čerpadlo k dopravě na SVO4	1 ks	TB30D04

Systém havarijního vysokotlakého doplňování

<i>Název</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
Vysokotlaké havarijní čerpadlo	3 ks	TQ13(23,33)D01
Nádrž zásoby kyseliny borité	3 ks	TQ13(23,33)B01

Systém havarijního vysokotlakého vstřikování

<i>Název</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo	3 ks	TQ14(24,34)D01
Nádrž zásoby kyseliny borité	3 ks	TQ14(24,34)B01

Systém ohřevu nádrže - jímky

<i>Název</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
Čerpadlo ohřevu	2 ks	TQ51(52)D01
Výměník ohřevu	2 ks	TQ51(52)W01

3.2.2 Technický popis zařízení

3.2.2.1 Sprchový systém

Za normálního provozu bloku je sprchový systém v režimu "pohotovosti". Nádrž chemických reagentů je zaplněna na nominální úroveň, čerpadla jsou odzdušněny a odzkoušeny, elektrozařízení (čerpadla, armatury) jsou elektricky odjištěny.

Měření a signalizace jsou uvedeny do činnosti. Při signálu "havárie", nebo při ztrátě napájení se provede automatický start sprchových čerpadel a otvírají se armatury na výtlaku čerpadel a armatury na trase přísávání z nádrže (v případě malého průtoku se otvírá recirkulace, která se uzavírá při dosažení průtoku $480 \text{ m}^3 / \text{h}$). Po snížení tlaku v kontejneru, nebo při teplotě v primárním okruhu $\leq 70^\circ\text{C}$ je možno odstavit systém, nebo ho převést na recirkulaci. Při havárii se kontrolují parametry a činnost zařízení (otevření armatur na výtlaku, stav armatur na recirkulaci, na trase přísávání chemických reagentů) pouze na blokové dozorně (nouzové dozorně).

Havarijní doplňování roztoku kyseliny borité do bazénů vyhořelého paliva provádí operátor ručně a pouze v havarijních situacích (a po odeznění havarijního signálu).

Za provozu bloku se provádí kontrola parametrů na blokové dozorně a stav zařízení na místě. Dále se provádí pravidelná kontrola chodu čerpadla na recirkulaci, kontrola chodu armatur a kontrola blokovacích podmínek.

Sprchové čerpadlo HVB I (1. blok Temelín)

Sprchové čerpadlo (výrobce SUMA bývalý SSSR) je odstředivé, horizontální, jednostupňové s dvoustranným oběžným kolem a oboustranným vstupem. Je složeno z tělesa, rámu, rotoru, ložisek a koncových čelních těsnění (viz. Obr. 3.2).

Sprchové čerpadlo HVB II (2. blok Temelín)

Sprchové čerpadlo typ SULZER - ZE 200-5400 (viz. Obr. 3.3) je odstředivé, horizontální, jednostupňové, průtokové pouze jedním směrem s axiálním vstupem a radiálním výstupem s letmo uloženým oběžným kolem, s kruhovým krytem upevněným ke spodní desce. Kryt čerpadla je vyrobený z kované oceli. Stacionárním difusérem umístěným za rotorem ve směru toku je zefektivněna transformace rychlostní energie.

Základní parametry	HVB I	HVBII
Průtok	700 [m^3 / h]	700 [m^3 / h]
Výtlak	1,4 [MPa]	1,4 MPa
Otáčky	2970/min	2980/min
Povolená kavitační rezerva	≤ 11 [m]	$\leq 9,5$ [m]
Tlak na sání	$\leq 2,2$ [MPa]	$\leq 2,2$ [MPa]
Teplota čerp. media	10 - 100 [°C]	10 - 150 [°C]
Výkon elektromotoru	500 [kW]	420 [kW]
Napětí	6 [kV]	6 [kV]

3.2.2.2 Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování

Systém zajišťuje dodávku roztoku kyseliny borité s koncentrací 12 g/kg do primárního okruhu. Při tlaku 0,098 MPa se jedná o průtok 700-750 m^3 / h , při tlaku 2,15 MPa o průtok 250 ÷ 300 m^3 / h . V režimu plánovaného dochlazování je průtok $\geq 350 m^3 / h$. Nízkotlaký havarijní systém je využíván v následujících režimech:

- režim havarijního dochlazování aktivní zóny reaktoru,
- režim plánovaného dochlazování aktivní zóny reaktoru,
- režim odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny reaktoru,
- režim pohotovosti (vyčkávání).

V režimu pohotovosti je nízkotlaký systém připraven ke startu čerpadel a ke splnění požadovaných funkcí.

Nádrž havarijní zásoby roztoku kyseliny borité

Nádrž je tvořena místností ve tvaru písmene L a její stěny jsou tvořeny dvojitou oblicovkou. Z prostoru mezi stěnami oblicovky je vyvedena soustava drenáží pro kontrolu těsnosti nerezové oblicovky (vnější, druhá stěna je uhlíková). Ve stropní části

jsou do nádrže svedeny tři vtoky pro jímání chladicí vody v kontejnmentu. Tyto vtoky ústí jednotlivě do tří nečistých částí nádrže, oddělených od společné čisté části soustavou šesti vertikálních sít s různou velikostí oka. Síta slouží k zachytávání nečistot. V podlaze čisté části nádrže jsou umístěny tři výtoky k jednotlivým divizím havarijních systémů. Nad každým výtokem v nádrži je instalován mařič víru k eliminaci přisávání vzduchu při nižších hladinách chladiva. Nádrž slouží jako zdroj kyseliny borité a v případě havárie slouží pro sběr uvolněného chladiva a tím vytvoření dostatečné zásoby vody pro havarijní systémy a vytvoření vodního cyklu chlazení AZ (viz obr 3.5).

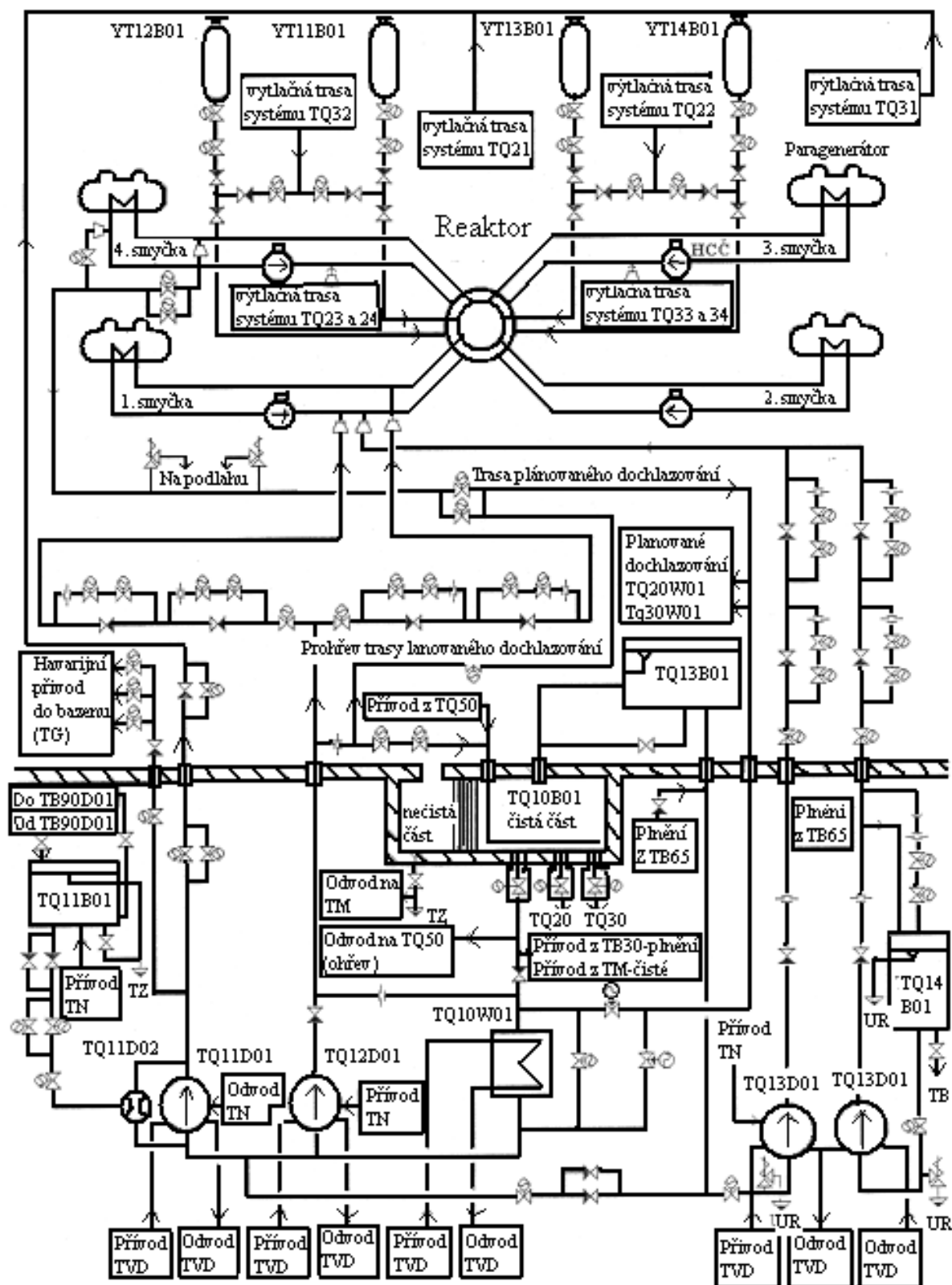
Základní parametry

Minimální objem	580 [m^3]
Pracovní objem	635 [m^3]
Teplota roztoku	55 - 60 [$^{\circ}C$]
Plocha dna	181 [m^2]
Koncentrace kys. borité	≥ 12 [g /kg]

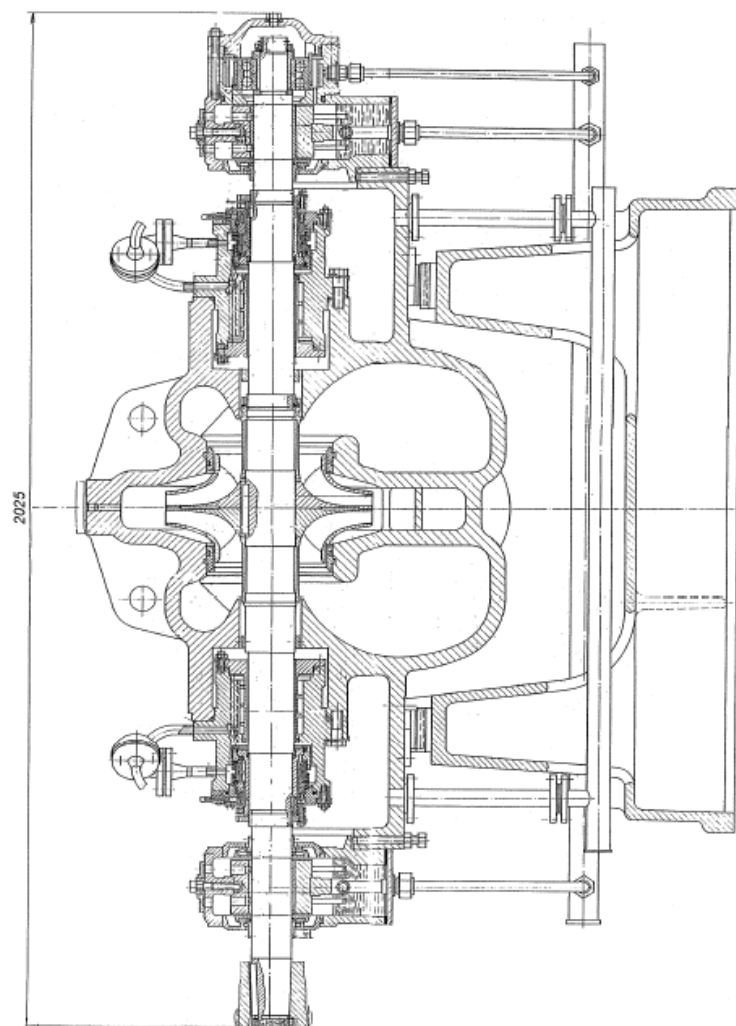
Výměník havarijního (normálního) dochlazování

Výměník je jednotělesový, horizontální, plášťového typu, dvouchodý v trubkovém i mezitrubkovém prostoru s protiproudým pohybem medií (viz. Obr. 3.4). Je určen k chlazení primárního chladiva v případě plánovaného dochlazování a k chlazení uniklého primárního chladiva v případě havarijního dochlazování primárního okruhu. Chlazené medium (primární voda) protéká mezitrubkovým prostorem, chladicí médium (technická voda důležitá) trubkovým prostorem.[2]

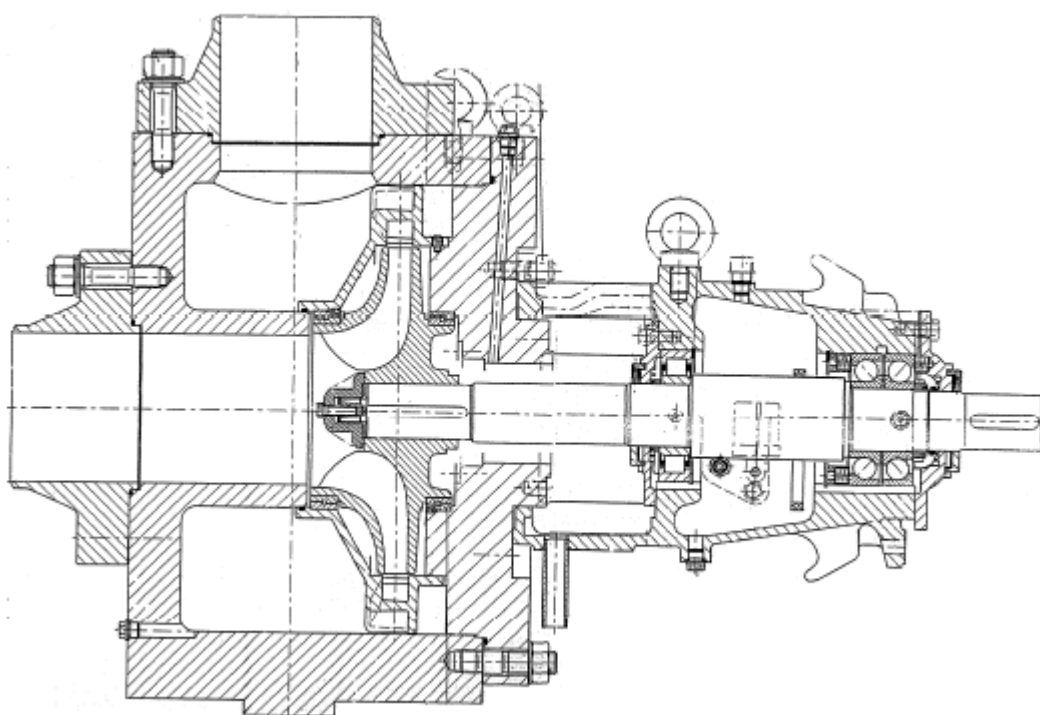
parametr	rozměr	plánované dochlazování		havarijní dochlazování	
		trubkový	mezitrubkový	trubkový	mezitrubkový
medium		TVD	H_3BO_3	TVD	H_3BO_3
průtok media	[m^3 / h]	3000	200-750	3000	1500
pracovní tlak	[MPa]	0,3-0,6	2,1	0,3-0,6	2,1
teplota media					
na vstupu	[$^{\circ}C$]	5÷40	150-60	40	150
na výstupu	[$^{\circ}C$]	dle bilance	70	70	90
hydraulický odpor	[MPa]	0,045	0,02	0,045	0,02
teplosměná plocha	[m^2]	996			
objem	[m^3]	5,07	4,85		
zkušební tlak	[MPa]	0,9	3,15		
hmotnost	[kg]	35230			
délka/průměr	[mm]	6850/1750			



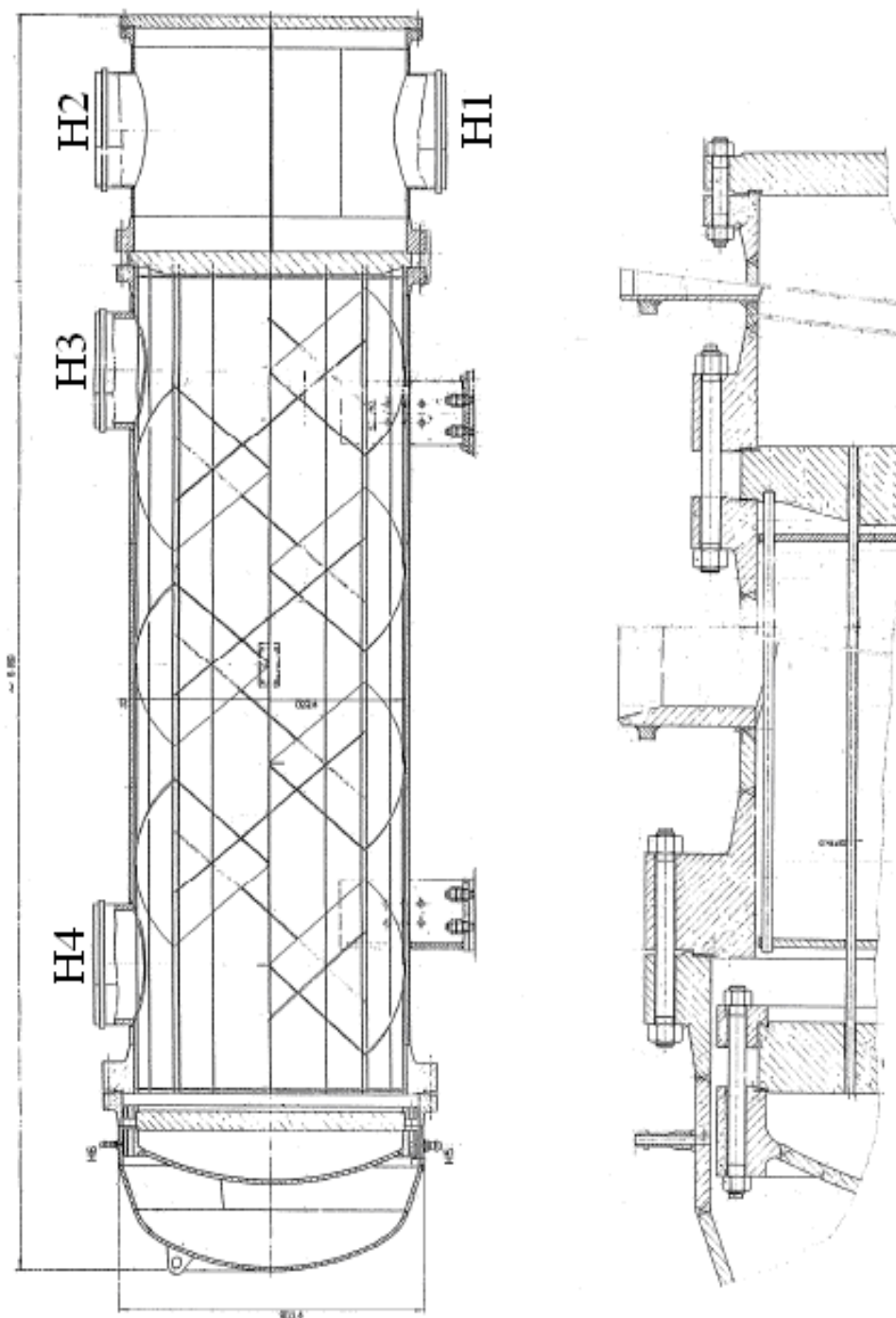
Obr 3.1 Schéma havarijního systému MIR 1200 [2]



Obr. 3.2 Sprchové čerpadlo havarijního normálního dochlazování [2]

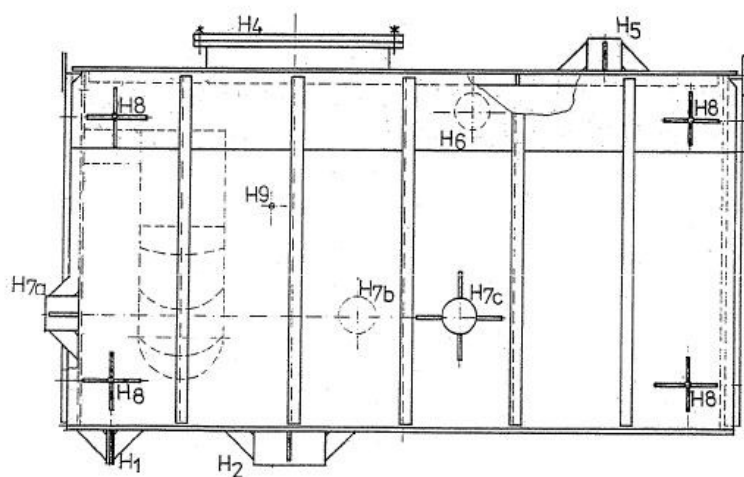
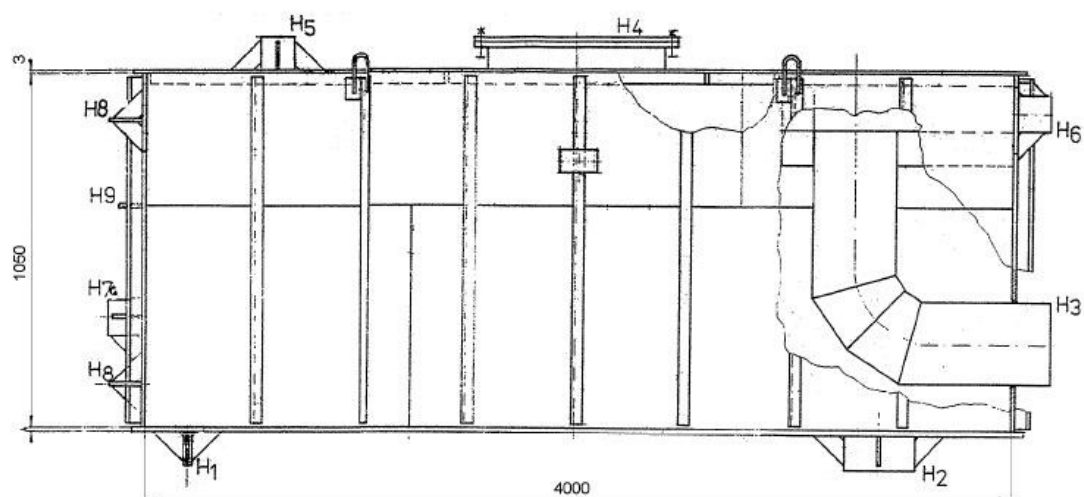


Obr. 3.3 Čerpadlo havarijního a normálního dochlazování a sprchové čerpadlo [2]



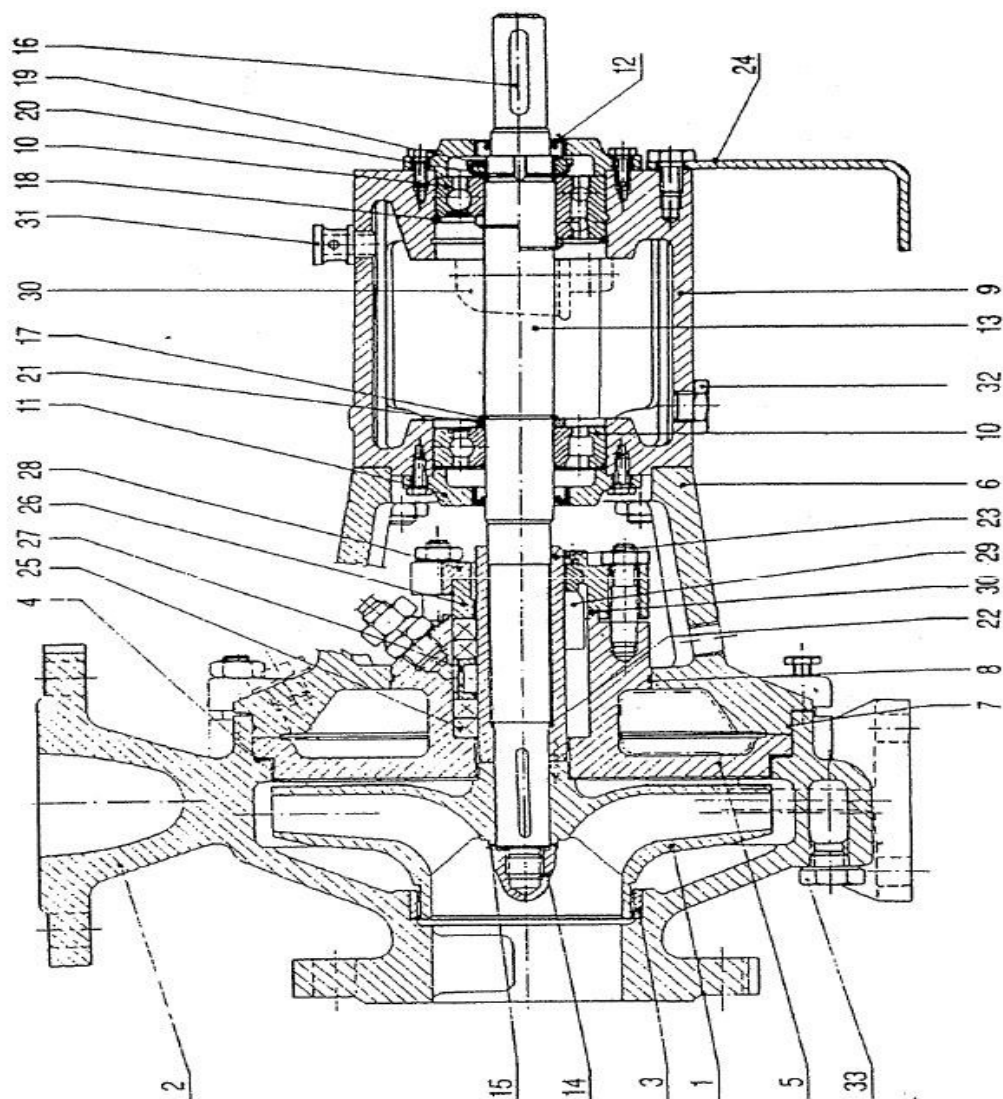
- H1- vstup technické vody důležité*
H2- výstup technické vody důležité
H3- vstup roztoku kyseliny borité z nádrže TQ10BB01
H4- výstup roztoku kyseliny borité na saní čerpadel TQ11(21,22)D01

Obr. 3.4 Výměník havarijního a normálního dochlazování [2]



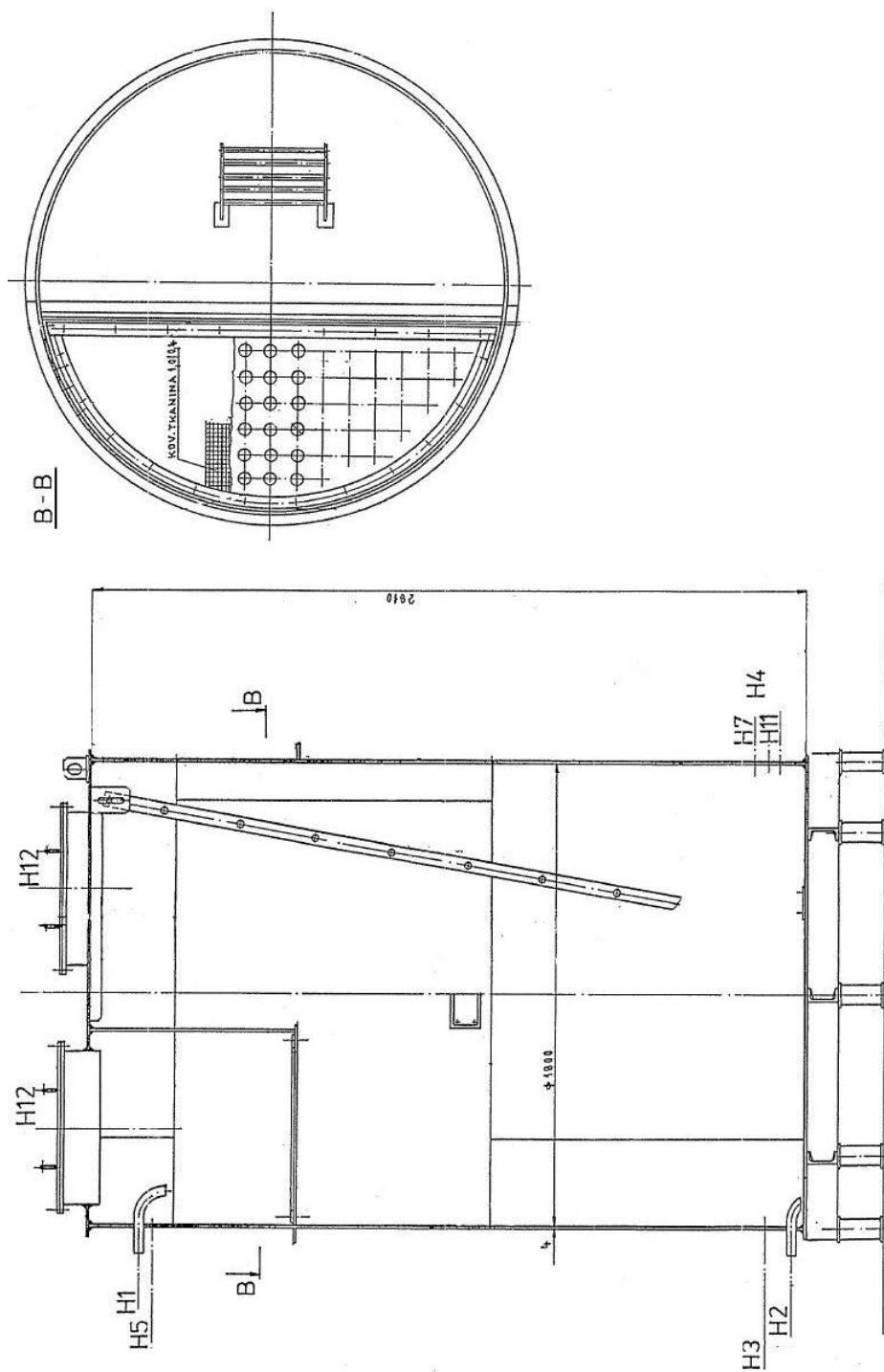
- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| H1- vypouštění
přívod k sání | H6- přívod do nádrže |
| H2- čerpadla | H7- přívod k bórometru |
| H3- přepad | H8- měření hladiny |
| H4- průlez | H9- návarek pro měření teploty |
| H5- odvzdušnění | |

Obr. 3.5 Nádrž roztoku kyseliny borité [2]



- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1. oběžné kolo | 18. pojistný kroužek |
| 2. spirála | 19. matice KM |
| 3. těsnicí kruh | 20. matice MB |
| 4. těsnění ploché | 21. opěrný kroužek |
| 5. víko čerpadla | 22. těsnění hřídele |
| 6. lucerna | 23. pouzdro ucpavky |
| 7. těsnicí kroužek | 24. patky konzoly |
| 8. těsnicí kroužek | 25. provazcové těsnění |
| 9. ložisková konzola | 26. ucpávkový kroužek |
| 10. ložisko | 27. zahlcovací kroužek |
| 11. víko ložiska | 28. ucpavková příruba |
| 12. gufero | 29. mechanická ucpávka |
| 13. hřídel | 30. doplňovač oleje |
| 14. matice oběžného kola | 31. zátka odvzdušňovací |
| 15. pojistná podložka | 32. zátka vypouštěcí |
| 16. pera | 33. zátka odvodňovací |
| 17. pojistný kroužek | |

Obr. 3.6 Čerpadlo k míchání nádrží roztoku boritanu draselného TB90D01 [2]



- | | |
|--|-------------------------------|
| H1- vstup roztoku | H6- přívod čistého kondenzátu |
| H2- vypouštění | H7- měření teploty |
| H3- výstup roztoku na ejektor | H11- měření hladiny |
| H4- výstup roztoku do speciální kanalizace | H12- průlez |
| H5- případ do speciální kanalizace | |

Obr. 3.7 Nádrž roztoku boritanu draselného TQ11(21,31)B01 [2]

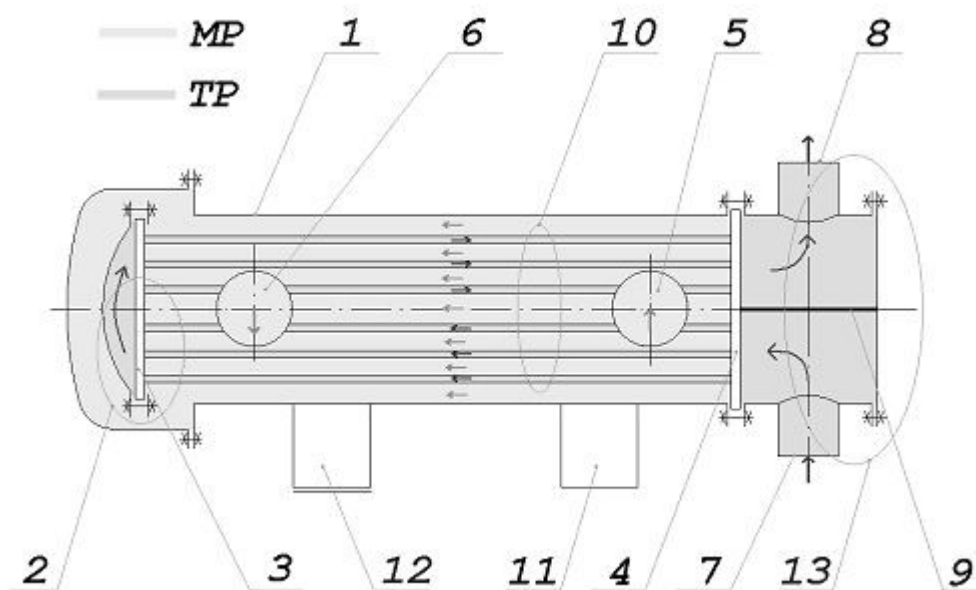
4. Tepelný výměník havarijního dochlazování (MIR1200

4.1 Systém odvodu zbytkového tepla

Zbytkové teplo, které vzniká po odstavení reaktoru, je odváděno pomocí parogenerátorů tak jako při normálním provozu a při poklesu teploty pod 150 °C pak pomocí výměníků nízkotlakého havarijního systému do okruhu chladicí technické vody důležité. V případě, že dojde k náhlému odstavení reaktoru v důsledku úniku chladiva z primárního okruhu, zajišťují odvod zbytkového tepla havarijní chladicí systémy, které se spouštějí automaticky. Tyto systémy jsou zálohované (3 x 100 %) a pokrývají účinky všech projektem definovaných havárií. Elektrické napájení těchto systémů je zajištěno v každém okamžiku ze systémů zajištěného napájení (diesलगенераторů).[3]

4.2 Konstrukce

Konstrukce výměníků je patrná ze schematu na obr. 6. Výměníky havarijního dochlazování jsou konstruovány jako trubkové výměníky s plovoucí hlavou. Ke sdílení tepla dochází v tzv. trubkovém svazku (10), což je svazek několika tisíc tenkých trubek. Trubky svazku jsou na okrajích připevněny do trubkovnic. Trubkovnice jsou masivní kruhové děrované desky. U výměníků s plovoucí hlavou je jedna trubkovnice pevná a druhá tzv. plovoucí. Na obr. 1 je pevná trubkovnice (4) sevřena mezi příruby pláště (1) a komory (13) (tzv. sevřená trubkovnice), existují též konstrukční provedení s trubkovnicí přivařenou k plášti (1). Plovoucí trubkovnice (3) je součástí plovoucí hlavy (2), kterou kromě ní tvoří ještě víko plovoucí hlavy s přírubou a tzv. dělený zámek (viz dále). Konstrukce výměníku s plovoucí hlavou umožňuje volnou teplotní dilataci trubkového svazku. Dalšími částmi výměníku jsou dno pláště (1) připevněné přířbovým spojem, hrdla (5,6) v plášti (1) pro vstup a výstup horkého roztoku H_3BO_3 a komora (13) s přepážkou (9) a hrdly (7,8) pro vstup a výstup chladicí vody. Výměník je uložen na sedlových podporách (11,12), z nichž jedna musí být kluzná (12), aby byla umožněna volná teplotní dilatace pláště (1) výměníku.[4]



Obr. 4.1 Schéma výměníku havarijního dochlazování [4]

- *MP - mezitrubkový prostor. Horké médium - roztok H_3BO_3 .*
- *TP - trubkový prostor. Chladicí médium - technická voda.*
- *1 - plášť MP*
- *2 - plovoucí hlava*
- *3 - plovoucí trubkovnice*
- *4 - sevřená trubkovnice*
- *5 - hrdlo-vstup horkého roztoku H_3BO_3 do MP*
- *6 - hrdlo - výstup roztoku H_3BO_3 z MP*
- *7 - vstup chladicího média do TP*
- *8 - výstup chladicího média z TP*
- *9 - přepážka komory*
- *10 - trubkový svazek*
- *11 - pevná sedlová podpora*
- *12 - posuvná sedlová podpora*
- *13 – komora*

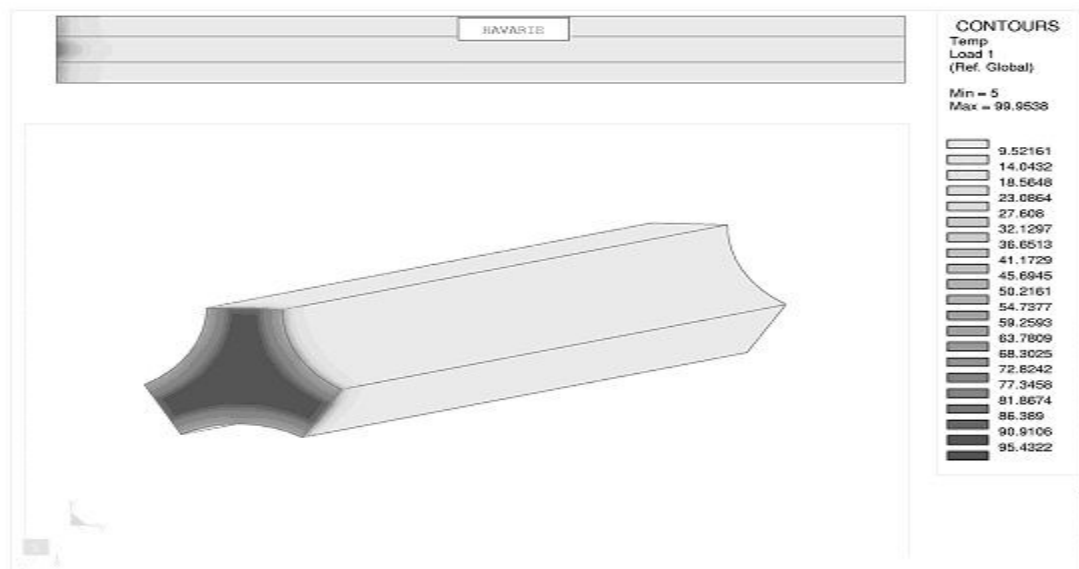
4.3 Funkce

Výměníky havarijního dochlazování slouží k dochlazování při haváriích primárního okruhu a k plánovitému dochlazování při odstávkách reaktoru. Horkým dochlazovaným médiem je silně ředěný roztok H_3BO_3 . Horké médium (max. teplota 150 °C) vstupuje vstupním hrdlem (5) do tzv. mezitrubkového prostoru (MP). Po průchodu MP a ochlazení vystupuje výstupním hrdlem (6). Chladicí médium - tzv. technická voda - vstupuje vstupním hrdlem do spodní části komory rozdělené přepážkou a vnitřkem dolní poloviny trubek trubkového svazku do plovoucí hlavy. Z plovoucí hlavy proudí chladicí voda horními trubkami svazku zpět do horní části komory a výstupním hrdlem ven. Oblast, kterou proudí chladicí voda se nazývá trubkový prostor (TP).[4]

4.4 Trubkovnice

Dalším problematickým uzlem při výpočtech výměníků jsou trubkovnice. Jak bylo uvedeno výše, jsou to masívní kruhové desky s malými průchozími kruhovými otvory. Z důvodu velkého množství těchto otvorů je prakticky nereálné vytvoření podrobného 3D MKP modelu trubkovnic. Trubkovnice je tedy nutné modelovat jako desky plné, bez otvorů, ovšem s náhradními mechanickými vlastnostmi v děrované oblasti. V normě [1] jsou uváděny jednoduché analytické vztahy pro výpočty koeficientů tuhosti trubkovnic a koeficientů napětí závislé na rozteči a průměru otvorů. V normě ASME [3] je uvedena podrobná metodika výpočtu napjatosti trubkovnic, jejichž součástí jsou grafy pro výpočet náhradních mechanických vlastností - Youngova modulu pružnosti E^* a Poissonova čísla μ^* závislé na rozteči otvorů a můstků mezi otvory. Koeficienty pro výpočty maximální intenzity napětí, uváděné v grafech v normách ASME [3], jsou kromě rozteče a můstku závislé též na tzv. koeficientech dvouosé napjatosti. Podle grafů uvedených v normě ASME [3] je též možné vypočítat špičková napětí v řezech pronikajících děrované pole trubkovnice pod různými úhly, nebo napětí vyvolané teplotním polem. Pro výpočty náhradních mechanických vlastností trubkovnic lze též s výhodou použít postupy spočívající v přesném namodelování malé reprezentativní

děrované oblasti (kvádru) a zjišťování mechanických vlastností (pomocí MKP) tohoto vzorku. Dalším problémem při výpočtech trubkovnic je výpočet teplotního pole trubkovnice pro výpočty termomechanických napětí. Celé děrované pole trubkovnice lze sestavit z malých trojstranných segmentů. Pomocí takového segmentu byla provedena analýza průběhu teplot v děrovaném poli trubkovnice (viz Obr. 4.2)[4]



Obr. 4.2 Trubkovnice [4]

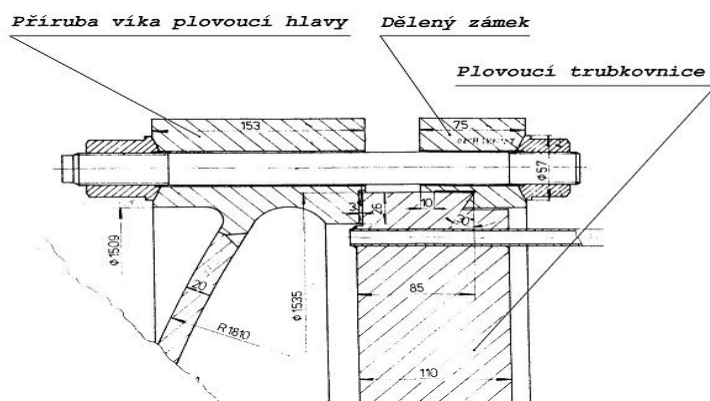
4.5 Trubkový svazek

Při MKP výpočtech výměníků je trubkový svazek modelován zejména z důvodu výztužného účinku na trubkovnice a z důvodu přenosu zatížení z jedné trubkovnice na druhou prostřednictvím trubkového svazku. V případě rotačně symetrických výpočtových modelů (většinou) se trubkový svazek modeluje systémem koaxiálních válců. Tuhost náhradního systému koaxiálních válců ve směru osy výměníku je shodná s tuhostí nahrazovaného svazku. U trubkového svazku byl též zkoumán vliv dosednutí trubkového svazku na plášť výměníku a trubkovnici pomocí samostatného nelineárního modelu včetně kontaktní úlohy dosednutí přepážek na plášť. Úloha byla řešena pro statická a seizmická zatížení. Výsledkem bylo určení namáhání pláště v místě dosednutí přepážky trubkového svazku a přídatného zatížení sevřené trubkovnice.

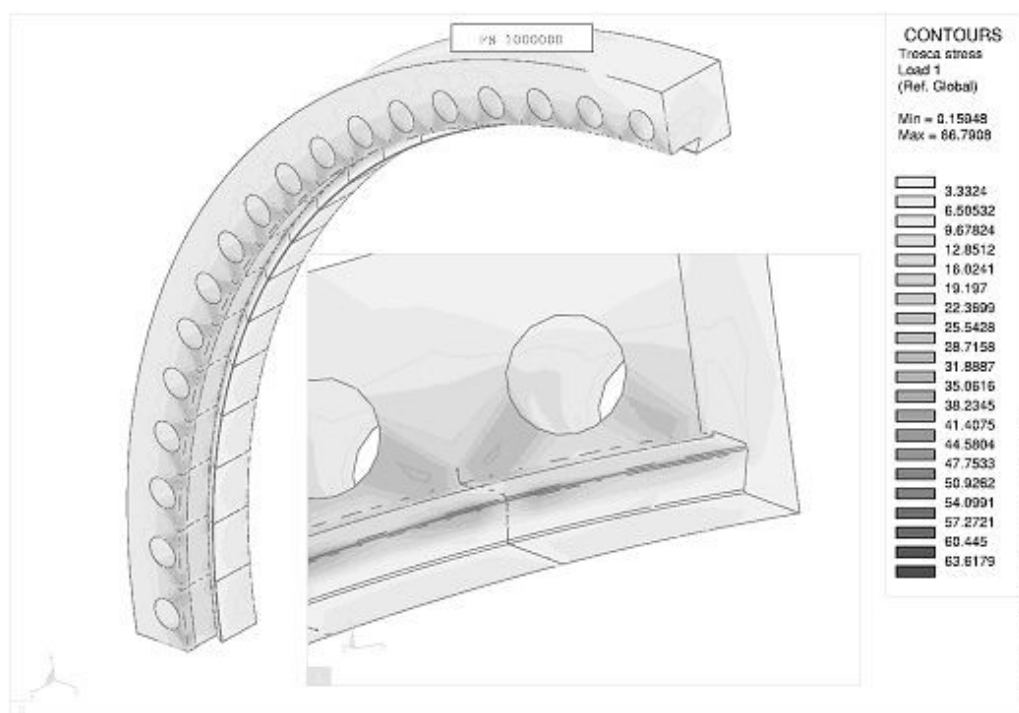
4.6 Dělený zámek

V oblasti plovoucí hlavy je kromě jiných (plovoucí trubkovnice, přírubový spoj) problematickým uzlem tzv. dělený zámek. Dělený zámek je kroužek opatřený ozubem s jehož pomocí je k plovoucí trubkovnici připojen přes přírubový spoj víko plovoucí hlavy (viz Obr. 4.3). Z montážních důvodů je tento kroužek po obvodě rozdělen minimálně na 2 části. - napjatost vyvolaná jednotkovou silou ve šroubech.

V druhé fázi byl vytvořen rotačně symetrický model děleného zámku a plovoucí trubkovnice. Tento rotačně symetrický model sloužil k vyšetřování chování děleného zámku v místech styku s plovoucí trubkovnicí - kontaktní úloha.[4]

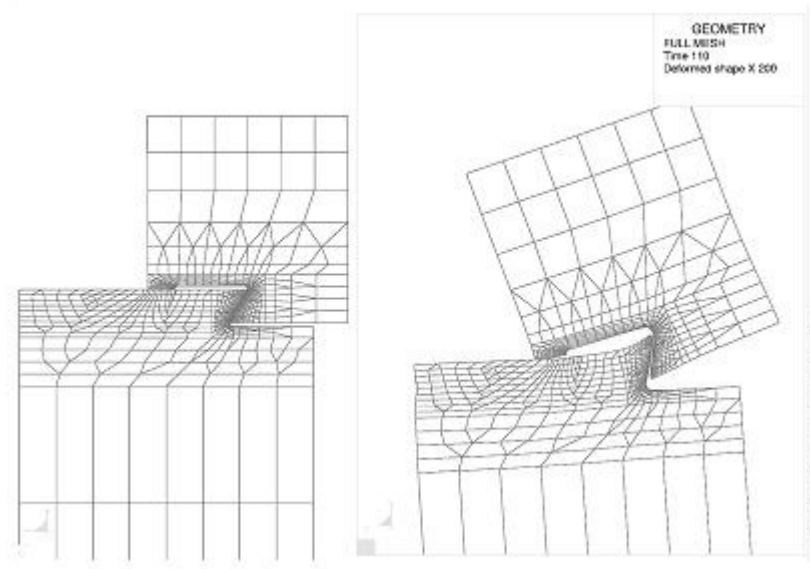


Obr. 4.3 Dělený zámek [4]



Obr. 4.4 3D model děleného zámku [4]

Díky tomuto modelu bylo mimo jiné zjištěno, že během namáhání děleného zámku silou ve šroubech dochází ke zmenšení kontaktní plochy a k jejímu posuvu směrem ke kořeni ozubu děleného zámku.



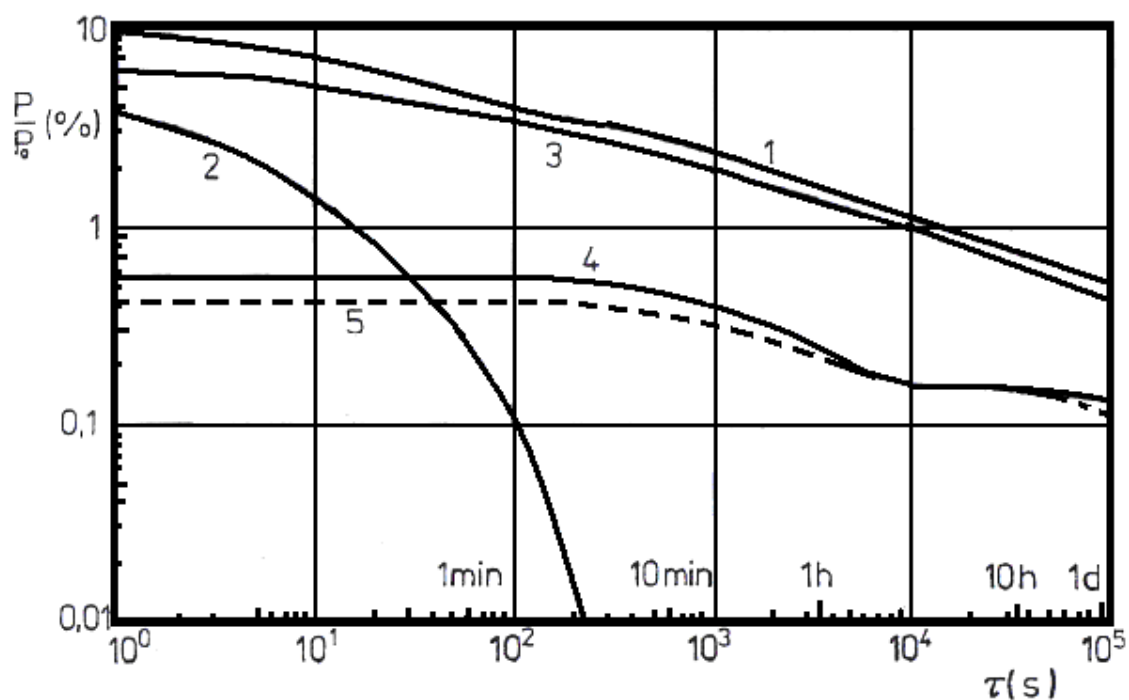
Obr. 4.5. Deformace v místě styku dělený zámek - plovoucí trubkovnice [4]

5. Zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru

V potenciálně nebezpečných situacích je nutné rychlé odstavení reaktoru. Na rozdíl od klasických energetických zařízení je maximální rychlost poklesu tepelného výkonu z různých příčin omezena. Obvykle používaný orgán rychlého odstavení reaktoru - absorpční tyče – se zasouvají do aktivní zóny konečnou rychlostí. Intenzita štěpné řetězové reakce klesá i při velké záporné reaktivitě exponenciálně a při relativně malé výkonové hladině se začíná uplatňovat teplo vznikající radioaktivním rozpadem produktů štěpení a radioaktivních izotopů. Tepelné zdroje, z nichž některé působí v energetickém reaktoru ještě dlouho po odstavení reaktoru, je možno rozdělit do několika skupin:

- dobíhající štěpná řetězová reakce,
- radioaktivní rozpad produktů štěpení
- radioaktivní rozpad izotopů vzniklých radiačním zachytem neutronů,
- radioaktivní rozpad aktivovaných materiálů aktivní zóny.

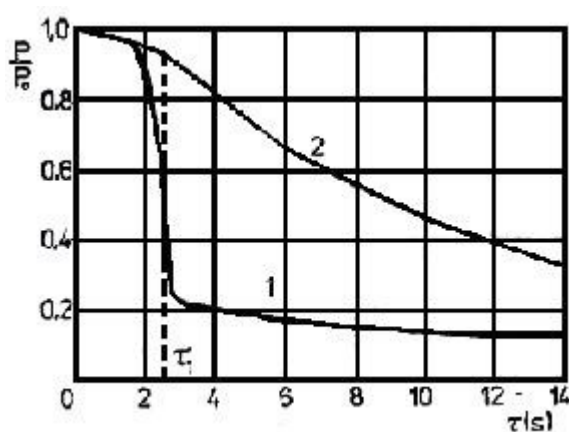
Zbytkový vývin tepla z dobíhající štěpné řetězové reakce lze přibližně chápat jako tepelný výkon vyvolaný náhlou skokovou změnou výkonu reaktoru s dlouhodobým odvodem tepla s exponenciálním charakterem typu (Obr. 5.1) .[7]



Obr.5.1. Zbytkový tepelný výkon reaktoru po odstavení. 1 – celkový výkon (3+2+4); 2 – výkon štěpné řetězové reakce; 3 – radioaktivní rozpad produktů štěpení; 4 – radioaktivní rozpad nuklidů; 5 - $x_p = 0,8$ [5]

$$\frac{P(\tau)}{P_0} = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot \tau} \quad \text{kde } \tau \text{ - probíhající čas od změny výkonu; } k_1, k_2 \text{ - konstanty pro daný reaktor} \quad (5.1)$$

Zbytkový tepelný výkon odstaveného reaktoru uvolňovaný následkem radioaktivních rozpadů lze vypočítat z poloempirického vztahu typu (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Časový průběh výkonu po rychlém odstavení lehkovodního reaktoru (křivka 1) a tepelný výkon odvedený do chladiva (křivka 2) v reaktoru [5]

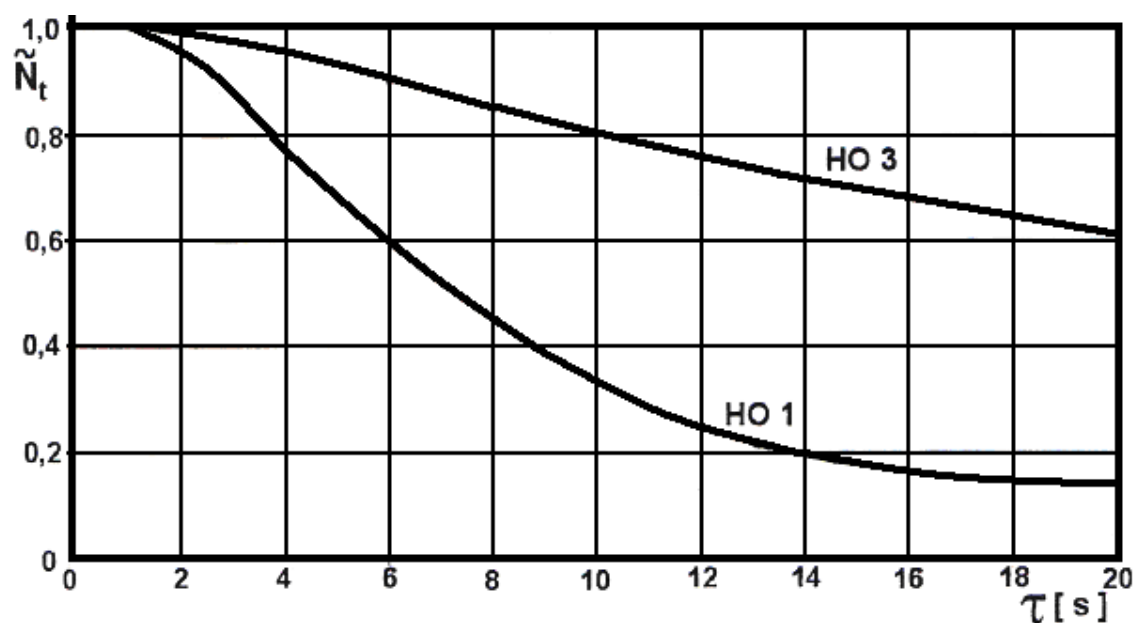
$\frac{P(\tau)}{P_0} = A \cdot \tau^{-b}$ kdy A a b jsou závislé na době po odstavení reaktoru, typu reaktoru, paliva apod.

Tepelný výkon odváděný chladičem z odstaveného reaktoru je pak součtem výkonových podílů z jednotlivých zdrojů tepla závislosti na čase. [7]

6. Havarijní odstavení reaktoru

Havarijní odstavení reaktoru je nejméně žádoucí přechodový režim bloku. Přestože se jedná o děj na první pohled jednoznačný, lze jej v závislosti od míry kvalifikace obslužného personálu prožít více či méně kulturně.

Protože se rovněž jedná o poruchu rovnováhy mezi výrobou a spotřebou páry vyvolanou ztrátou zdroje tepla, hrozí při havarijním odstavení extrémní pokles tlaku v hlavním parním kolektoru (HPK) a tím i větší, než nezbytné, vychlazení vody v prvním okruhu (I.O.) se všemi průvodními jevy – prudký pokles hladiny v kompenzátoru (KO), pokles tlaku v I.O. atd. Je proto nutné odstavit včas, ale nikoli předčasně, spotřebiče páry, resp. Dohlédnout na jejich včasné automatické odstavení (odstavení Turbogenerátoru uzavřením propouštěcích stanic, uzavření redukčních stanic napájených parou z hlavního parního kolektoru). Při havarijním odstavení pokles středních hodnot teploty vody I.O. o 30 K za normální, pak každý kelvin navíc je mírou nevládnutí procesu (Obr. 6.1) [5]

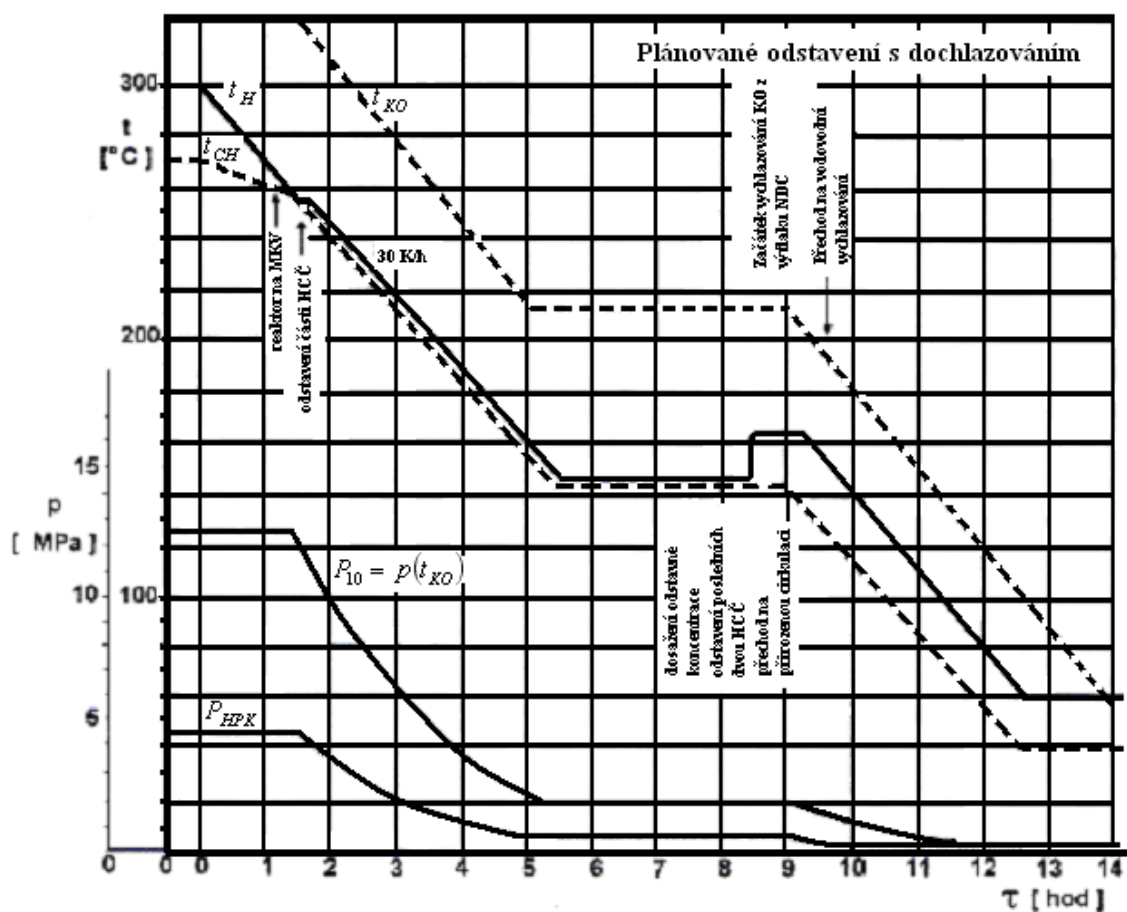


Obr. 6.1 Průběh tepelného výkonu po působení havarijní ochrany 1. a 3. druhu [7]

7. Plánované odstavení bloku a vychlazování primárního okruhu

Pokud nechceme překročit dovolené trendy ochlazování primárního okruhu, je nutné snižovat výkon reaktoru rychlostí zhruba $1\% N_{nom}/\text{minutu}$.

Snižování výkonu bloku provádí personál při konstantním tlaku páry v hlavním parním kolektoru (HPK) postupem analogickým zvyšování výkonu bloku. Po snížení výkonu turbogenerátoru (TG) na nulu provede personál postupné odstavení jednotlivých TG uzavřením rychlouzavíracích ventilů a parní výkon se převede. Režim ruční regulace reaktoru snižuje operátor výkon reaktoru. Teď je možné zahájit odstavování reaktoru zvyšováním koncentrace kyseliny borité v I.O. na odstavnou koncentraci při stále nucené cirkulaci vody v I.O. nejlépe všemi, ale alespoň dvěma, resp. Třemi hlavními cirkulačními čerpadly (HCC). Zvyšováním koncentrace H_3BO_3 ve vodě I.O. by mělo být ukončeno do zahájení vychlazování I.O. Vychlazování I.O. je nutné organizovat současně v celém objemu I.O.. Výměna vody v odstavných smyčkách se děje zpětnou cirkulací, kompenzátoru řízenou cirkulací prostřednictvím sprchového systému. Vychlazování I.O. se provádí postupným řízeným snižováním tlaku páry. (Obr. 7.1) [5]



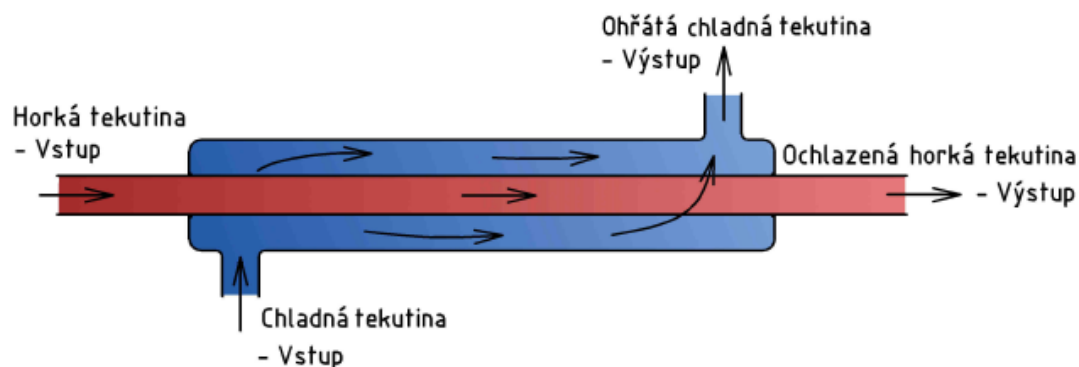
Obr. 7.1 Plánované odstavení s dochlazováním [7]

8. Druhy výměníku

8.1 Trubkové výměníky

8.1.1 Trubka v trubce

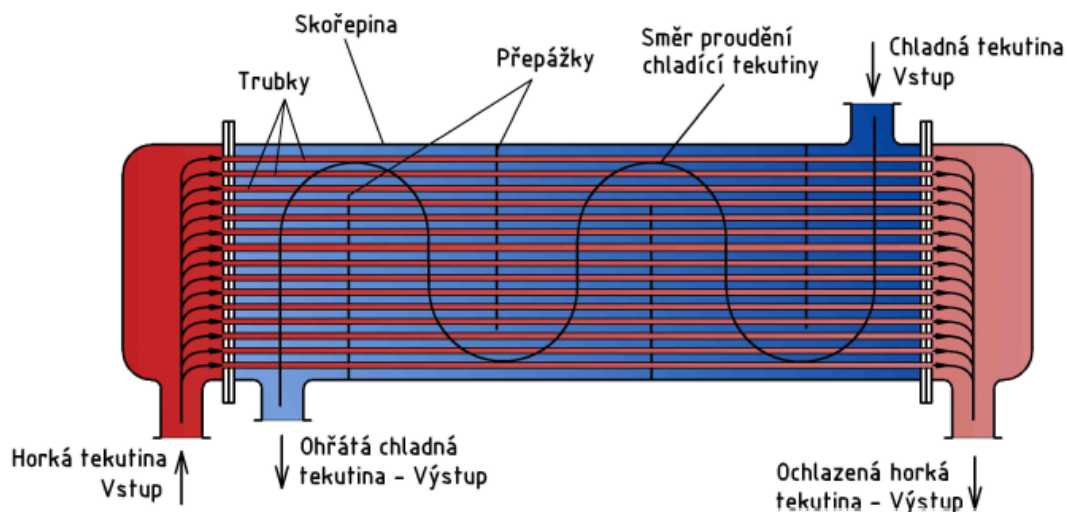
Výměník tohoto typu je konstrukčně nejjednodušší. Výměník se skládá ze dvou soustředných trubek viz. obr. 8.1, kterými protékají média o různých teplotách. Výměník je souproutý, výměna probíhá přes stěnu vnitřní trubky. Teplejší médium předává během svého průtoku vnitřní trubce své teplo. [8]



Obr. 8.1 Schéma tepelného výměníku trubka v trubce [8]

8.1.2 Trubkové výměníky

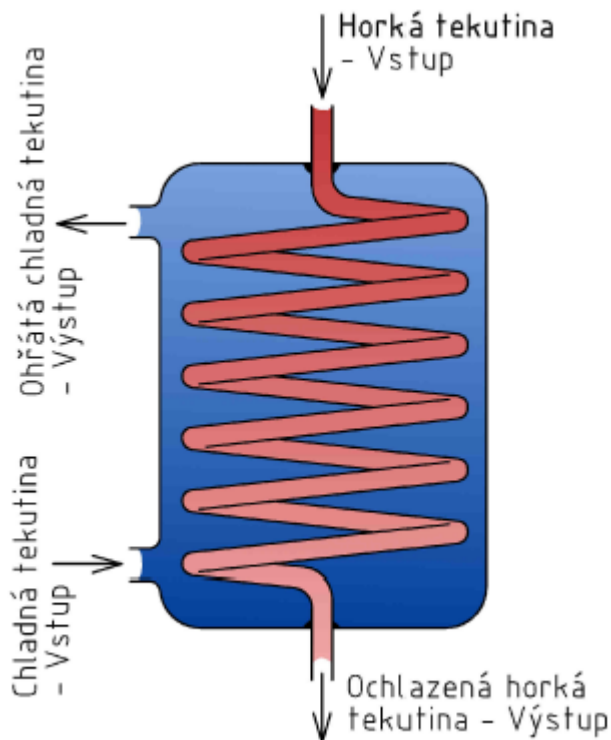
Tyto typy jsou nejvíce průmyslově využívány. Horké médium vtéká do výměníku z levé strany a proud se rozděluje do velkého množství malých trubek. Těmito trubkami přechází přes vnitřní část výměníku, snižuje svoji teplotu a vychází na pravé straně. Druhé médium vyplňuje celou část výměníku v kontaktu s trubkami. Médium vtéká do výměníku ze shora, proud je opačný oproti druhému médiu, jedná se o protiproudý výměník. V obálce výměníku jsou umístěny přepážky, kterými nutí médium přes tyto přepážky obíhat viz. obr. 8.2. [8]



Obr. 8.2 Schéma trubkového výměníku [8]

8.1.3 Spirálové výměníky

Tento výměník v menší odměně je typu trubka v trubce. Je složen z vnitřní a vnější trubky viz. obr. 8.3. Vnitřní trubka je stočená do spirály, tím se zvětší její plocha a tepelná výměna. Výměník je protiproudý. Efektivnost zvýšíme počtem spirál. [8]



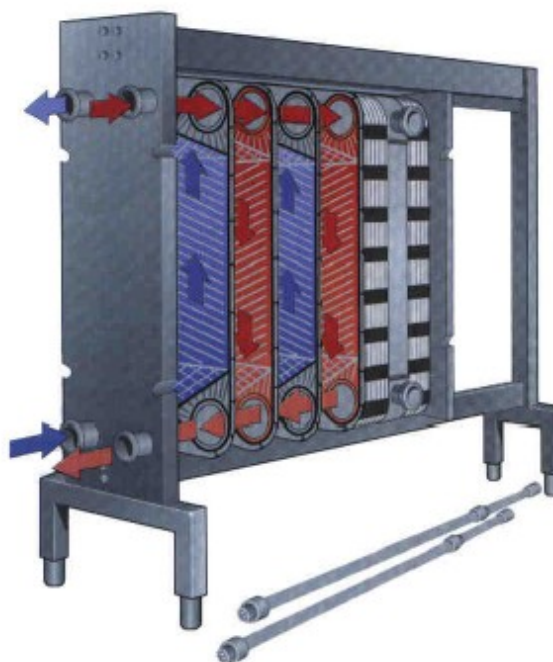
Obr. 8.3 Schéma spirálového výměníku [8]

8.2 Deskové výměníky

8.2.1 Rozebíratelné výměníky

Dochází k výměně skrze desku. Obě strany desek jsou v přímém kontaktu s médii o jiných teplotách. Deska tvoří bariéru mezi těmito médii. Výměník se skládá z množství desek, které jsou umístěny za sebou viz. obr. 8.4. S větším počtem desek vzrůstá tepelná výměna. Chladné médium vtéká do výměníku levým spodním vstupem, část média vtéká dále do výměníku a část obtéká desku směrem nahoru. Horké médium vstupuje vpravo nahoře a protéká mezi první a druhou deskou směrem dolů k pravému výstupu. První deska je v kontaktu zepředu s chladným médiem a vzadu s horkým médiem. Horké médium předává své teplo chladnějšímu médiu skrze desky.

[8]



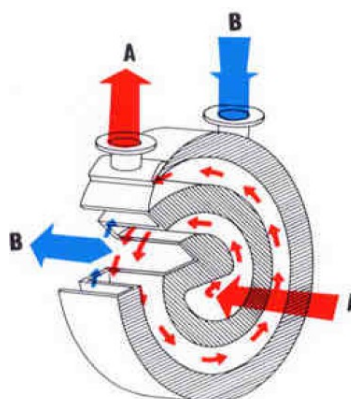
Obr. 8.4 Schéma funkce deskového výměníku [8]

8.2.2 Nerozebíratelné výměníky

Tento výměník je totožný s rozebíratelným výměníkem, ale nelze rozebírat, jelikož pláty jsou napevno uchycené. Pláty jsou buď svařené, nebo napájené. Dokáží pracovat na velmi nízkých tlacích až po 4 MPa. Nemají těsnění proto zvládají teploty od $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pájené výměníky zvládnou teploty maximálně okolo $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. nelze je mechanicky čistit. [8]

8.2.3 Spirálové výměníky

Tento výměník je zvláštní, ale často průmyslově používaný. Horké médium vtéká zepředu výměníku (A). Poté protéká spirálou celým výměníkem a vystupuje vlevo nahoře. Pravým horním vstupem vtéká chladné médium do výměníku (B), v kontaktu se spirálou obtéká její stěny a vystupuje vodorovně vpravo viz. obr. 8.5. [8]



Obr. 8.5 Schéma funkce spirálového výměníku [8]

9. Návrh výměníku

9.1 Popis výměníků

Tepelný výpočet se provádí pro výměník havarijního dochlazování jaderného reaktoru. Jedná se o trubkový výměník typu s plavoucí hlavou, voda-voda + kyselina boritá, je vyroben z oceli, nerozebíratelné, svařované konstrukce. Teplosměnná plocha je tvořena 3150 trubek. V hladkých trubkách Tr016x1,5 protéká ohříváné médium voda, délka trubek je 6 m, přes 5 přepážek protéká voda s ředěnou kyselinou boritou. Průměr výměníku je 1550 mm, délka výměníku je 6850 mm.

9.2 Vstupní parametry médií

Médium	Vstup[° C]	Výstup[°C]
Ohříváné	40	70
Ochlazované	150	90

9.2.1 Průtok média

Technická voda důležitá (TVD) 3000 $[m^3 \cdot h^{-1}] \rightarrow 0,8333 [m^3 \cdot s^{-1}]$ - ohříváné médium
Zředěný roztok (H_3BO_3) 1500 $[m^3 \cdot h^{-1}] \rightarrow 0,4166 [m^3 \cdot s^{-1}]$ - ochlazované médium

9.2.2 Rychlost proudění

$$\dot{w}_t = 2,54 [m \cdot s^{-1}]$$

$$\dot{w}_s = 1,04 [m \cdot s^{-1}]$$

9.2.3 Průtočné množství

$$\dot{V}_t = 1,6 \cdot 10^{-6} [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$\dot{V}_s = 0,42 \cdot 10^{-6} [m^3 \cdot s^{-1}]$$

9.2.4 Hmotnostní tok vody

$$\dot{M}_t = 833,3 [kg \cdot s^{-1}]$$

$$\dot{M}_s = 416,6 [kg \cdot s^{-1}]$$

9.3 Určení střední teploty vody ohřívané

$$t_s = \frac{t_{11} + t_{12}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (9.1)$$

$$t_{st} = \frac{40 + 70}{2} = 55 [^{\circ}\text{C}]$$

9.4 Určení střední teploty vody ochlazované

$$t_s = \frac{t_{21} + t_{22}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (9.2)$$

$$t_{ss} = \frac{150 + 90}{2} = 120 [^{\circ}\text{C}]$$

Hodnoty odečtené z tabulek

		$t_{st} 55 [^{\circ}\text{C}]$	$t_{ss} 120 [^{\circ}\text{C}]$
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	$0,5109 \cdot 10^{-6}$	$0,246 \cdot 10^{-6}$
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,647	0,685
c_p	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	4,1822	4,25
η	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$	$503,6 \cdot 10^{-6}$	$201,1 \cdot 10^{-6}$
Pr	[1]	3,26	1,47
ρ	$[kg \cdot m^3]$	985,7	946,5

12.1 Příloha č. 1 - Fyzikální vlastnosti vody při tlaku 98,1 kPa, popř. při tlaku na mezi sytosti

9.4.1 Určení celkové střední teploty

$$t_c = \frac{t_{st} + t_{ss}}{2}$$

$$t_c = \frac{120 + 55}{2} = 87,5^{\circ}\text{C} \rightarrow \eta_w = 322,5 \cdot 10^{-6} [N \cdot s \cdot m^{-2}] \quad (9.3)$$

$$\text{Pr}_w = 2,01 [1]$$

9.5 Výpočet tepelného výkonu

9.5.1 Výpočet hmotnostního průtoku ohřívajícího média

$$\dot{m}_t = \rho_t \cdot \dot{V}_t [kg \cdot s^{-1}] \quad (9.4)$$

$$\dot{m}_t = 985,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} = 0,1577 [kg \cdot s^{-1}]$$

9.5.2 Výpočet hmotnostního průtoku ochlazovaného média

$$\begin{aligned}\dot{m}_s &= \rho_s \cdot \dot{V}_s \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ \dot{m}_t &= 946,5 \cdot 0,42 \cdot 10^{-4} = 0,103975 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]\end{aligned}\quad (9.5)$$

9.5.3 Výpočet tepelného výkonu ohřívajícího média

$$\begin{aligned}\dot{Q}_t &= \dot{m}_t \cdot c_{pt} \cdot (t_{12} - t_{11}) \quad [\text{W}] \\ \dot{Q}_t &= 0,1577 \cdot 4,1822 \cdot 10^3 \cdot (70 - 40) = 19785,98 [\text{W}]\end{aligned}\quad (9.6)$$

9.5.4 Výpočet tepelného výkonu ochlazovaného média

$$\begin{aligned}\dot{Q}_s &= \dot{m}_s \cdot c_{ps} \cdot (t_{21} - t_{22}) \quad [\text{W}] \\ \dot{Q}_s &= 0,03975 \cdot 4,25 \cdot 10^3 \cdot (150 - 90) = 10136,25 [\text{W}]\end{aligned}\quad (9.10)$$

9.5.5 Střední tepelný výkon

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{stř} &= \frac{\dot{Q}_t + \dot{Q}_s}{2} \quad [\text{W}] \\ \dot{Q}_{stř} &= \frac{19785,98 + 10136,25}{2} = 14961,11 [\text{W}]\end{aligned}\quad (9.11)$$

9.6 Reynoldsovo kritéria pro ohřívající médium

$$\text{Re}_t = \frac{\dot{w}_t \cdot d_1}{\nu_t} \quad [1] \quad (9.12)$$

kde d_1 je vnitřní průměr trubky

$$\text{Re}_t = \frac{2,54 \cdot 0,0145}{0,246 \cdot 10^{-6}} = 72088,4 > 2320 \Rightarrow \text{Turbulentní proudění}$$

9.7 Reynoldsovo kritéria pro ochlazované médium

$$\text{Re}_s = \frac{w_s \cdot d_s}{\nu_s} \quad [1] \quad (9.13)$$

kde d_s je průměr přepážky

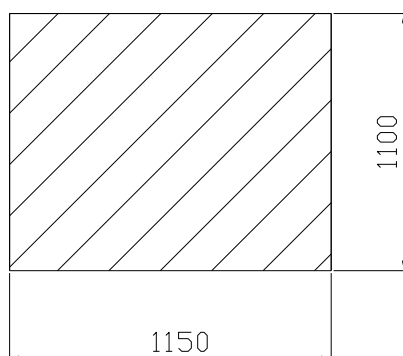
$$\text{Re}_s = \frac{1,04 \cdot 1,286}{0,246 \cdot 10^{-6}} = 5436747,9 > 2320 \Rightarrow \text{Turbulentní proudění}$$

9.7.1 Výpočet plochy přepážky

$$d_s = \frac{4 \cdot S}{O} \quad [m] \quad (9.14)$$

kde S je plocha přepážky (viz. obr.9.7)
 O je smočený obvod (viz. obr.9.7)

$$d_s = \frac{4 \cdot (1,1 \cdot 1,55)}{2 \cdot (1,1 \cdot 1,55)} = 1,286 [m]$$



Obr.9.1 Plocha přepážky

9.8 Nusseltovo kritérium pro ohřívání médium

$$Nu_t = 0,036 \cdot Re_t^{0,8} \cdot Pr_t^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\eta_t}{\eta_w} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{d_t}{l} \right)^{\frac{1}{18}} \quad [1] \quad (9.15)$$

kde Pr je Prandtlovo číslo
 η_t je viskozita ohřívajícího média
 η_w je viskozita střední hodnoty
 l je délka trubky

$$Nu_t = 0,036 \cdot 72088,4^{0,8} \cdot 3,26^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{503,6 \cdot 10^{-6}}{322,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{0,0145}{6} \right)^{\frac{1}{18}} = 314,402 [1]$$

9.9 Nusseltovo kritérium pro ochlazování médium

$$Nu_t = 0,036 \cdot Re_s^{0,8} \cdot Pr_s^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\eta_s}{\eta_w} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{d_s}{l} \right)^{\frac{1}{18}} \quad [1] \quad (9.16)$$

kde η_s je viskozita ochlazovaného média

$$Nu_t = 0,036 \cdot 5436747,9^{0,8} \cdot 1,47^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{201,1 \cdot 10^{-6}}{322,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{1,286}{6} \right)^{\frac{1}{18}} = 8641,068[1]$$

9.10 Výpočet součinitele přestupu tepla ohříváného média

$$\alpha_t = \frac{Nu_t \cdot \lambda_t}{d_t} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (9.17)$$

kde λ_t je součinitel teplotní vodivosti ohříváného média

$$\alpha_t = \frac{314,402 \cdot 0,647}{0,0145} = 14028,839 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

9.11 Výpočet součinitele přestupu tepla ochlazovaného média

$$\alpha_s = \frac{Nu_s \cdot \lambda_s}{d_s} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (9.18)$$

kde λ_s je součinitel teplotní vodivosti ochlazovaného média

$$\alpha_s = \frac{8641,068 \cdot 0,685}{1,286} = 4602,746 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

9.12 Výpočet součinitele prostupu tepla

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_t \cdot d_1} + \Sigma \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_s \cdot d_{n+1}}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (9.19)$$

kde λ je tepelná vodivost pro ocel $\lambda = 200 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

kde d_1 je vnitřní průměr trubky

kde d_2 je vnější průměr trubky

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{14028,834 \cdot 0,0145} + \frac{1}{2 \cdot 200} \cdot \ln \frac{0,016}{0,0145} + \frac{1}{4602,746 \cdot 0,016}} = 167,63 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

9.13 Výpočet vodního ekvivalentu ohřívaného média

$$\dot{W}_t = c_{pt} \cdot M_t \left[kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \right] \quad (9.20)$$

kde c_{pt} je střední měrná tepelná kapacita ohřívaného média

$$\dot{W}_t = 4,25 \cdot 833,3 = 3541,53 \left[kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \right]$$

9.14 Výpočet vodního ekvivalentu ochlazovaného média

$$\dot{W}_s = c_{ps} \cdot M_s \left[kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \right] \quad (9.21)$$

kde c_{ps} je střední měrná tepelná kapacita ochlazovaného média

$$\dot{W}_s = 4,1822 \cdot 416,6 = 1739,79 \left[kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \right]$$

9.15 Výpočet parametru

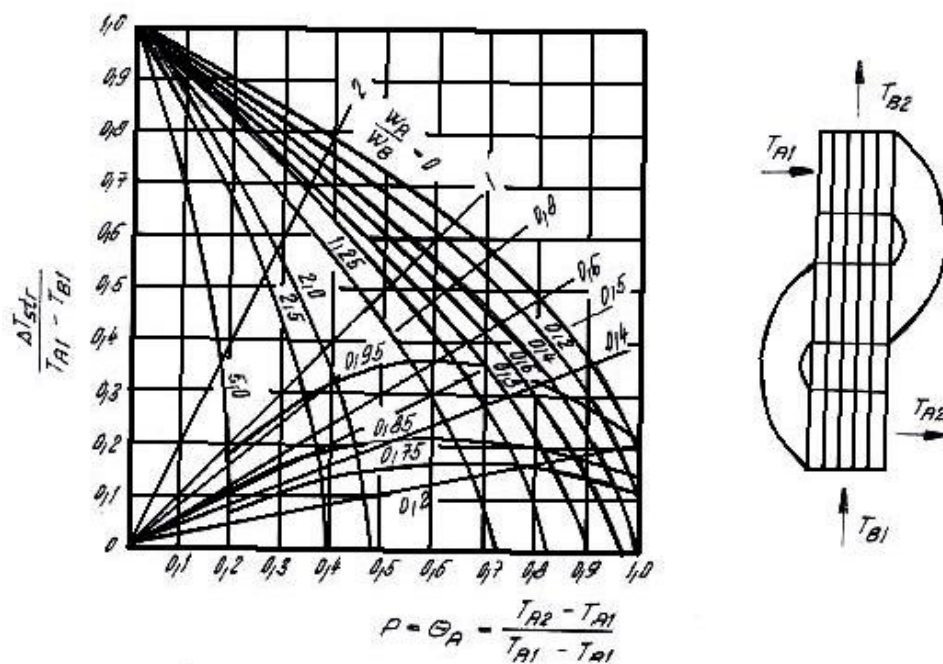
$$P = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{T_{s1} - T_{t1}} \quad [1] \quad (9.22)$$

$$P = \frac{150 - 90}{150 - 40} = 0,5454 [1]$$

$$R = \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}_t} \quad [1] \quad (9.23)$$

$$R = \frac{1739,79}{3541,53} = 0,4911 [1]$$

kde $P; R$ odečteme z obr. 9.2



Obr.9.2 Teplotních poměrů ve výměníku [8]

$$\frac{\Delta T_{stř}}{T_{s1} - T_{t1}} = 0,3 \quad (9.24)$$

odtud

$$\Delta T_{stř} = 0,3 \cdot (150 - 40) = 33[^\circ C] \quad (9.25)$$

9.16 Výpočet teplosměnné plochy

$$S = \frac{\dot{M}_s \cdot c_{ps} \cdot (T_{s1} - T_{s2})}{k \cdot \Delta T_{stř}} [m] \quad (9.26)$$

$$S = \frac{416,6 \cdot 10^3 \cdot 4,1822 \cdot (150 - 90)}{167,63 \cdot 33} = 18897[m]$$

9.17 Počet trubek

$$Tr = \frac{S}{l} [l] \quad (9.27)$$

$$Tr = \frac{18897}{5,5} = 3150[l]$$

10. Závěr

Havarijní dochlazování aktivní zóny jaderné elektrárny MIR 1200 lze dělit na několik zabezpečovacích systémů: sprchový havarijní systém; nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování aktivní zóny; systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování; systém ohřevu nádrže- jímky. Tyto čtyři systémy jsou potřebné k bezpečnému chodu jaderné elektrárny MIR 1200.

Havarijní výměník MIR 1200 je sestaven z válcové ocelové nádoby o průměru 1550 mm. Na konci válce je tzv. plavoucí hlava. Délka výměníku je 6850 mm, délka trubek je 6 m. Havarijní výměník má dva vstupy a dva výstupy. První médium je technická voda důležitá, která se ohřívá z teploty 40 °C na 70 °C. Druhé médium je silně zředěná voda s kyselinou boritou, která se ochlazuje ze 150 °C na 90 °C. Technická voda důležitá protéká trubkami a silně zředěná voda s kyselinou boritou protéká přes přepážky havarijního výměníku. Havarijní výměník vyrábí Královopolské strojírna v Brně.

Mým úkolem bylo navrhnout havarijní výměník MIR 1200. Ze vstupních hodnot jsem vypočítal střední tepelný výkon 14961,11 W. Součinitel přestupu tepla, přes Reynoldsovo a Nusseltovo číslo, což je $167,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a na závěr jsem určil počet trubek 3150.

11. Seznam použité literatury

- [1] <http://www.gvp.cz/~vondrackova/Fyzika/3.E-%20refer%C3%A1ty%20-elektromagnetismus/14-Jadern%C3%A1%20elektr%C3%A1rna-VAJNAR.pdf>
- [2] Materiály poskytl Prof. Ing. Kolat Pavel, DrSc.
- [3] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/8.html>
- [4] <http://www2.it.cas.cz>
- [5] Hejzlar, R.: Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 8-01-03190-X
- [6] http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD_reaktor#VVER.2FPWR
- [7] Heřmanský, B. : Termomechanika jaderných reaktorů. Nakladatelství československé akademie Praha 1987
- [8] Ostrezi, J. : Tepelné výměníky a problematika jejich zanášení. VUT 2009
- [9] http://ok1zed.sweb.cz/s/el_jaderna.htm
- [10] <http://ekolist.cz/fotobanka/displayimage.php?pos=-68>
- [11] <http://www.skoda-js.cz/cs/mir-1200/index.shtml>
- [12] Janošík, J. : Kompenzátor objemu jaderné elektrárny. TUO-VŠB 2010
- [13] Zaoral, M. : Hlavní cirkulační čerpadlo BIKS 500. ČVUT 2010

12. Přílohy

12.1 Příloha č. 1 - Fyzikální vlastnosti vody při tlaku 98,1 kPa, popř. při tlaku na mezi sytosti

t [°C]	ρ [kg m ⁻³]	c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	$10^6 \eta$ [Pa s]	$10^6 \nu$ [m ² s ⁻¹]	$10^6 \alpha$ [m ² s ⁻¹]	Pr [1]
51	987,6	4180,8	0,642	537,2	0,5439	0,156	3,50
52	987,1	4181,2	0,643	528,4	0,5353	0,156	3,43
53	986,6	4181,5	0,644	519,9	0,5269	0,156	3,37
54	986,2	4181,9	0,646	511,6	0,5188	0,157	3,31
55	985,7	4182,2	0,647	503,6	0,5109	0,157	3,26
56	985,2	4182,6	0,648	495,7	0,5032	0,157	3,20
57	984,7	4183,0	0,649	488,1	0,4956	0,158	3,15
58	984,3	4183,4	0,650	480,6	0,4883	0,158	3,09
59	983,8	4183,9	0,651	473,4	0,4812	0,158	3,04
60	983,3	4184,3	0,652	466,3	0,4743	0,158	2,99
.
.
.
120	946,5	4250,1	0,685	201,1	0,2460	0,165	1,47

13. Seznam výkresové dokumentace

Výkres č.1

Havarijní výměník

BAK01